

**APPUNTI DI ALGEBRA LINEARE E
GEOMETRIA**

Federico G. Lastaria

Mauro Saita

Indice

1	Spazi vettoriali e Applicazioni Lineari	5
1.1	Gli spazi vettoriali reali	5
1.1.1	Lo spazio vettoriale delle matrici $m \times n$	7
1.2	Combinazioni lineari. Sottospazi.	9
1.3	Basi e dimensioni. Coordinate.	12
1.4	Riduzione a scala	14
1.5	Esercizi	16
1.6	Prodotto di matrici. Matrici invertibili	20
1.7	Esercizi	22
1.8	Applicazioni lineari	26
1.9	Esercizi	31
1.10	Applicazioni lineari e matrici	32
1.10.1	Matrice associata a un'applicazione lineare	32
1.10.2	Cambio di base	35
1.11	Esercizi	36
1.12	Somme di sottospazi. Formula di Grassmann	37
1.13	Nucleo e immagine	39
1.14	Esercizi	41
2	Sistemi lineari. Rette e piani nello spazio	43
2.1	Sistemi lineari. Il teorema di Rouché-Capelli	43
2.2	Sottospazi affini	45
2.3	Il metodo di eliminazione di Gauss	47
2.3.1	Esempi	48
2.4	Esercizi	52
2.5	Rette e piani nello spazio	56
2.6	Esercizi	59
3	Spazi vettoriali euclidei	63

3.1	Spazi vettoriali euclidei	63
3.2	Esercizi	65
3.3	Matrici ortogonali	66
3.4	Proiezioni ortogonali e matrici associate	67
3.4.1	Proiezioni ortogonali su rette	67
3.4.2	Disuguaglianza di Cauchy-Schwarz. Angoli	68
3.4.3	Matrici di proiezioni su rette	70
3.4.4	Il procedimento di Gram-Schmidt	71
3.4.5	Proiezioni ortogonali	73
3.4.6	Matrici di proiezioni	75
4	I determinanti	77
4.1	Proprietà caratteristiche del determinante.	77
4.1.1	Esistenza e unicità del determinante.	80
4.1.2	Calcolo del determinante	82
4.1.3	Il determinante del prodotto	83
4.2	Orientamento di uno spazio vettoriale	84
4.3	Interpretazione geometrica del determinante	86
4.4	Esercizi	88
5	Autovettori e Autovalori	91
5.1	Introduzione	91
5.2	Autovalori e autovettori	92
5.3	Il polinomio caratteristico	94
5.4	Matrici e operatori diagonalizzabili	96
5.4.1	Esercizi	99
A	Tem d'esame svolti	101
A.1	Tema 1	101
A.2	Tema 2	103
A.3	Tema 3	106
A.4	Tema 4	108
A.5	Tema 5	110
A.6	Tema 6	114
A.7	Tema 7	116

Capitolo 1

Spazi vettoriali e Applicazioni Lineari

1.1 Gli spazi vettoriali reali

I punti del piano, e quelli dello spazio, si possono rappresentare mediante coppie o, rispettivamente, terne ordinate di numeri reali, quando si fissa un sistema di riferimento cartesiano. Questo suggerisce l'idea di considerare l'insieme \mathbb{R}^n delle n -uple ordinate di numeri reali come uno spazio di “vettori”, che scriveremo come vettori riga:

$$v = \left| a_1 \quad . \quad . \quad . \quad a_n \right| \quad \text{o anche} \quad (a_1, \dots, a_n)$$

o come vettori colonna:

$$v = \begin{vmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{vmatrix}$$

Lo spazio \mathbb{R}^n delle n -uple di numeri reali è l'esempio più comune di spazio vettoriale. Quando pensiamo a \mathbb{R}^n come a uno spazio vettoriale, intendiamo prendere in considerazione *soltanto due* operazioni:

- la *somma di vettori*:

$$\begin{vmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 + b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n + b_n \end{vmatrix};$$

- la *moltiplicazione di uno scalare reale per un vettore*:

$$\lambda \begin{vmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda b_n \end{vmatrix}$$

dove λ è un numero reale.

Veniamo ora alla definizione precisa di spazio vettoriale.

Definizione 1.1.1 *Uno spazio vettoriale reale è un insieme V con due operazioni:*

- la somma:

$$\begin{aligned} V \times V &\longrightarrow V \\ (v, w) &\longmapsto v + w \end{aligned}$$

- la moltiplicazione per uno scalare:

$$\begin{aligned} \mathbb{R} \times V &\longrightarrow V \\ (\lambda, v) &\longmapsto \lambda v \end{aligned}$$

Queste operazioni devono soddisfare i seguenti assiomi:

1. *La somma è commutativa: per ogni v, w in V*

$$v + w = w + v$$

2. *La somma è associativa: per ogni u, v, w in V*

$$(u + v) + w = u + (v + w)$$

3. *Esiste un vettore in V , il vettore nullo 0 , che è elemento neutro rispetto all'operazione di somma, nel senso che*

$$v + 0 = v$$

per ogni vettore v .

4. *Per ogni vettore $v \in V$ esiste un vettore, l'opposto di v , denotato $-v$, che sommato a v dà il vettore nullo:*

$$v + (-v) = 0.$$

Diremo allora che V , con l'operazione di somma, è un gruppo abeliano.

5. *Per ogni v, w in V e per ogni λ, μ in \mathbb{R}*

$$\begin{aligned} \lambda(\mu v) &= (\lambda\mu)v \\ (\lambda + \mu)v &= \lambda v + \mu v \\ \lambda(v + w) &= \lambda v + \lambda w \\ 1v &= v \end{aligned}$$

Esempio. Abbiamo già visto che l'insieme \mathbb{R}^n delle n -uple ordinate di numeri reali (n intero positivo) è uno spazio vettoriale.

Esempio. Sia V l'insieme di tutte le funzioni a valori reali definite su un qualunque insieme D :

$$V = \mathbb{R}^D = \{\text{tutte le funzioni } f : D \longrightarrow \mathbb{R}\}.$$

Qui consideriamo solo le due operazioni di somma $f + g$ di funzioni e di moltiplicazione λf di un numero per una funzione, definite nel modo seguente:

$$(f + g)(x) = f(x) + g(x)$$

$$(\lambda f)(x) = \lambda f(x)$$

per ogni f, g in V , per ogni $x \in D$ e per ogni $\lambda \in \mathbb{R}$. Con queste due operazioni, V è uno spazio vettoriale.

Vedremo che un caso tipico è quello in cui D è l'insieme \mathbb{R} dei numeri reali o un suo sottoinsieme, come nell'esempio seguente.

Esempio. Un esempio di spazio vettoriale è l'insieme $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ di tutte le funzioni $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$. Una funzione $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ si chiama *successione di numeri reali* e viene di solito scritta come

$$(f_0, f_1, f_2, \dots).$$

Esempio. Siano a e b due numeri fissati e poniamo $S = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid ax + by = 0\}$ l'insieme delle soluzioni $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ dell'equazione lineare omogenea $ax + by = 0$. Si vede facilmente che S è uno spazio vettoriale.

Esempio. Siano a, b, c sono numeri fissati e sia $c \neq 0$. Allora $S = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid ax + by + c = 0\}$ non è uno spazio vettoriale. Perché?

1.1.1 Lo spazio vettoriale delle matrici $m \times n$

Un esempio importante di spazio vettoriale è quello delle matrici $m \times n$. Siano m, n due interi ≥ 1 . Una tabella di numeri

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{2n} \\ \cdot & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{mn} \end{vmatrix}$$

è detta *matrice $m \times n$* . La matrice ha m righe e n colonne. Chiameremo a_{ij} l'*elemento* (o *entrata*, o *componente*) di posto ij . L'indice i è l'*indice di riga*, l'indice j è l'*indice di colonna*. Dunque a_{ij} è l'elemento che compare sulla i -esima riga e sulla j -esima colonna. In genere per denotare una matrice usiamo un simbolo come A, B eccetera.

Esempio. $A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 2 & -1 & 2 \end{vmatrix}$ è una matrice 2×3 . Se ci riferiamo a questa matrice come a $A = (a_{ij})$, allora $a_{11} = 1$, $a_{12} = 0$, $a_{13} = 3$, $a_{21} = 2$, $a_{22} = -1$ e $a_{23} = 2$.

Esempio. Una matrice $m \times 1$ è un *vettore colonna* di \mathbb{R}^m . Non useremo l'indice di colonna, e scriveremo un vettore colonna semplicemente come:

$$\begin{vmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m \end{vmatrix}$$

Una matrice $1 \times n$ è un *vettore riga* di \mathbb{R}^n . Ometteremo l'indice di riga, e scriveremo un vettore riga come

$$\left| \begin{array}{cccc} y_1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & y_n \end{array} \right| \quad \text{oppure come} \quad (y_1, \dots, y_n).$$

Una matrice 1×1 contiene un unico numero, e non la distingueremo dalla sua unica componente.

Somma di matrici. Si definisce la somma di due matrici solo quando sono entrambe dello stesso tipo $m \times n$. Siano dunque $A = (a_{ij})$ e $B = (b_{ij})$ due matrici $m \times n$. La *somma* $A + B$ è la matrice $C = (c_{ij})$ di tipo $m \times n$, il cui elemento di posto ij è

$$c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}.$$

Si dice che la somma di matrici si fa *per componenti*.

Esempio. Se $A = \begin{vmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 7 \end{vmatrix}$, $B = \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 3 & 2 \end{vmatrix}$, allora $A + B = \begin{vmatrix} 4 & 1 \\ 3 & 9 \end{vmatrix}$

Esempio. La matrice nulla $m \times n$ è la matrice 0 con tutte le componenti nulle. Allora

$$A + 0 = A$$

per ogni matrice A di tipo $m \times n$.

Ad esempio:

$$A = \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 3 & -2 \end{vmatrix}, \quad -A = \begin{vmatrix} -2 & -1 \\ -3 & 2 \end{vmatrix},$$

Per ogni matrice A , si denota con $-A$ la matrice di componenti $(-A)_{ij} = -A_{ij}$. Allora $A + (-A) = 0$.

Moltiplicazione di un numero per una matrice. Se λ è un numero reale e $A = (a_{ij})$ è una matrice $m \times n$, definiamo λA come la matrice $m \times n$ la cui componente $(\lambda A)_{ij}$ è

$$(\lambda A)_{ij} = \lambda a_{ij}.$$

Esempio. Se $\lambda = 2$ e $A = \begin{vmatrix} 6 & 0 \\ 2 & 7 \end{vmatrix}$, allora $2A = \begin{vmatrix} 12 & 0 \\ 4 & 14 \end{vmatrix}$

Diremo anche che λA è il *prodotto* dello *scalare* λ per la matrice A .

Proprietà della somma di matrici e della moltiplicazione di uno scalare per una matrice.

A, B, C sono matrici dello stesso tipo $m \times n$ e λ, μ sono numeri reali.

1. (Proprietà commutativa) $A + B = B + A$
2. (Proprietà associativa) $(A + B) + C = A + (B + C)$
3. (La matrice 0 è elemento neutro rispetto alla somma)

$$A + 0 = A$$

4. (Ogni matrice ha un'opposta rispetto alla somma)

$$A + (-A) = 0$$

5. $\lambda(\mu A) = (\lambda\mu)A$
6. $\lambda(A + B) = \lambda A + \lambda B$
7. $(\lambda + \mu)A = \lambda A + \mu A$
8. $1A = A$

Tutte queste proprietà seguono facilmente dalle definizioni e dalle corrispondenti proprietà dei numeri reali. Riassumendo, l'insieme $M(m \times n, \mathbb{R})$ delle matrici reali $m \times n$, dotato delle operazioni di somma e moltiplicazione per uno scalare, è uno spazio vettoriale.

1.2 Combinazioni lineari. Sottospazi.

Sia V uno spazio vettoriale reale e siano v_1, \dots, v_k vettori di V .

Definizione 1.2.1 Per combinazione lineare dei vettori v_1, \dots, v_k intendiamo un qualsiasi vettore di V del tipo

$$\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k,$$

dove $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ sono numeri reali. I numeri $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ sono i coefficienti della combinazione lineare.

Esempio. Consideriamo i due vettori $v_1 = {}^t(1, 0, 1)$, $v_2 = {}^t(1, 1, 2)$ di \mathbb{R}^3 . Una loro combinazione lineare è ad esempio il vettore

$$3v_1 + 2v_2 = 3 \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} + 2 \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3 \\ 0 \\ 3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 2 \\ 2 \\ 4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5 \\ 2 \\ 7 \end{vmatrix}.$$

La loro più generale combinazione lineare è il vettore

$$\lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 = \begin{vmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 \\ \lambda_2 \\ \lambda_1 + 2\lambda_2 \end{vmatrix}$$

dove λ_1, λ_2 sono numeri reali arbitrari. L'insieme di tutte queste combinazioni lineari è il *piano* generato da v_1 e v_2 .

Esempio. Consideriamo i due vettori di \mathbb{R}^2

$$e_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad e_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Diciamo che ogni vettore di \mathbb{R}^2 è combinazione lineare di e_1 e e_2 . Infatti, per ogni vettore (λ_1, λ_2) di \mathbb{R}^2 ,

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{vmatrix} = \lambda_1 \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} + \lambda_2 \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} = \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2.$$

Definizione 1.2.2 *I vettori v_1, \dots, v_k si dicono linearmente dipendenti se esistono k numeri $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ non tutti nulli per i quali*

$$\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k = 0.$$

In caso contrario, i vettori v_1, \dots, v_k si dicono linearmente indipendenti.

Dunque i vettori v_1, \dots, v_k sono linearmente indipendenti quando

$$\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k = 0$$

vale solo quando $\lambda_1 = \dots = \lambda_k = 0$.

Esempi (a) Consideriamo i vettori $e_1 = (1, 0)$, $e_2 = (0, 1)$ dello spazio vettoriale \mathbb{R}^2 . Supponiamo che una loro combinazione lineare sia nulla:

$$0 = \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2 = \lambda_1(1, 0) + \lambda_2(0, 1) = (\lambda_1, \lambda_2)$$

Ora $(\lambda_1, \lambda_2) = 0$ solo quando $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$. Dunque i vettori e_1, e_2 sono linearmente indipendenti.

Allo stesso modo si dimostra che $e_1 = (1, \dots, 0)$, $e_2 = (0, 1, \dots, 0)$, $e_n = (0, \dots, 1)$ di \mathbb{R}^n (le componenti di e_i sono tutte zero tranne la i -esima, che è 1) sono vettori linearmente indipendenti di \mathbb{R}^n .

(b) Consideriamo i vettori $v_1 = (1, 0, 0)$, $v_2 = (1, 1, 1)$, $v_3 = (0, -1, 1)$ di \mathbb{R}^3 . Una loro arbitraria combinazione lineare è

$$\lambda_1(1, 0, 0) + \lambda_2(1, 1, -1) + \lambda_3(0, 1, -1) = (\lambda_1 + \lambda_2, \lambda_2 + \lambda_3, -\lambda_2 - \lambda_3).$$

Dire che una tale combinazione lineare è uguale a zero significa che:

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \\ \lambda_2 + \lambda_3 = 0 \\ -\lambda_2 - \lambda_3 = 0 \end{cases}$$

ossia (la terza equazione equivale alla seconda)

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \\ \lambda_2 + \lambda_3 = 0 \end{cases}$$

Ora questo sistema lineare omogeneo non ha solo la soluzione nulla. Ad esempio, $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1, \lambda_3 = 1$ è una soluzione non nulla. Ne segue che i tre vettori v_1, v_2, v_3 sono linearmente dipendenti.

Definizione 1.2.3 *Sia V uno spazio vettoriale. Diciamo che W è un sottospazio vettoriale di V se*

- W è uno spazio vettoriale;
- c' è un'inclusione $W \subseteq V$, cioè W è contenuto come sottoinsieme in V .

Un sottospazio di uno spazio vettoriale non può essere vuoto: contiene almeno il vettore nullo. Scrivendo in modo un po' più formale, un sottoinsieme non vuoto W di uno spazio vettoriale V è sottospazio vettoriale di V quando:

$$\begin{aligned} \forall x, y \quad x, y \in W &\implies x + y \in W \\ \forall \lambda \forall x \quad \lambda \in \mathbb{R}, x \in W &\implies \lambda x \in W \end{aligned}$$

Esempio: I sottospazi di \mathbb{R}^2 . I sottospazi W di \mathbb{R}^2 sono di tre tipi:

1. il sottospazio 0 costituito dal solo vettore nullo: $0 = \{(0, 0)\}$;
2. ogni retta passante per l'origine;
3. l'intero spazio \mathbb{R}^2 .

Questo può essere dimostrato nel modo seguente: è ovvio anzitutto che quelli elencati sono tutti sottospazi di \mathbb{R}^2 . Per provare che sono gli unici sottospazi vettoriali di \mathbb{R}^2 , si ricordi la regola del parallelogramma per sommare due vettori. Si vede allora facilmente che se W contiene due vettori w_1, w_2 che non appartengono a una stessa retta, allora W deve contenere anche tutte le loro combinazioni lineari

$$\lambda w_1 + \mu w_2$$

e quindi deve coincidere con l'intero piano: $W = \mathbb{R}^2$. Se W invece non contiene due vettori siffatti, allora siamo in uno degli altri due casi.

Esempio: I sottospazi di \mathbb{R}^3 . In modo analogo, si dimostra che i sottospazi W di \mathbb{R}^3 sono dei seguenti quattro tipi:

1. il sottospazio 0 costituito dal solo vettore nullo: $0 = \{(0, 0, 0)\}$;
2. ogni retta passante per l'origine;

3. ogni piano passante per l'origine;
4. l'intero spazio \mathbb{R}^3 .

La classificazione dei sottospazi di \mathbb{R}^2 e \mathbb{R}^3 sarà chiarita dal concetto di *dimensione*, che introdurremo più avanti: ad esempio, i quattro tipi di sottospazi di \mathbb{R}^3 corrispondono rispettivamente a sottospazi di dimensione 0, 1, 2, 3.

Esempio. Il semipiano

$$P = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y \geq 0\}.$$

non è un sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^2 (anche se è chiuso rispetto alla somma).

Esempio. Poniamo:

$$r = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x - y = 0\} \quad s = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x - y = 0\}$$

(r e s sono due rette passanti per l'origine.) L'unione insiemistica $r \cup s$ non è un sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^2 (anche se è chiuso rispetto al prodotto per scalari).

Dati k vettori v_1, \dots, v_k di uno spazio vettoriale V , denotiamo con $L(v_1, \dots, v_k)$ l'insieme di tutte le loro combinazioni lineari:

$$L(v_1, \dots, v_k) = \{\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k, \lambda_1, \dots, \lambda_k \in \mathbb{R}\}$$

È facile vedere che l'insieme $L(v_1, \dots, v_k)$ è di fatto un sottospazio vettoriale di V . Diremo che $L(v_1, \dots, v_k)$ è il sottospazio vettoriale *generato* dai vettori v_1, \dots, v_k .

1.3 Basi e dimensioni. Coordinate.

Definizione 1.3.1 Si dice che un insieme ordinato di vettori (v_1, \dots, v_n) di uno spazio vettoriale V è una base di V se:

- a) v_1, \dots, v_n sono linearmente indipendenti;
- b) v_1, \dots, v_n generano V :

$$L(v_1, \dots, v_n) = V$$

(vale a dire se ogni vettore di V è combinazione lineare di v_1, \dots, v_n).

Esempio. Una base dello spazio vettoriale \mathbb{R}^n è costituita dai vettori:

$$\begin{aligned} e_1 &= (1, 0, 0, \dots, 0) \\ e_2 &= (0, 1, 0, \dots, 0) \\ &\dots\dots\dots \\ e_n &= (0, 0, 0, \dots, 1) \end{aligned}$$

Infatti sappiamo già che questi vettori sono linearmente indipendenti. Inoltre un qualsiasi elemento $v = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ di \mathbb{R}^n si scrive come combinazione lineare di e_1, \dots, e_n :

$$v = (x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1(1, 0, 0, \dots, 0) + \dots + x_n(0, 0, 0, \dots, 1) = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n.$$

La base (e_1, \dots, e_n) si chiama *base canonica* di \mathbb{R}^n .

Teorema 1.3.2 *Se (v_1, \dots, v_n) è una base di uno spazio vettoriale V , allora ogni vettore $v \in V$ si scrive esattamente in un modo come combinazione lineare di v_1, \dots, v_n .*

Dimostrazione. Poiché i vettori v_1, \dots, v_n generano V , ogni vettore v si scrive come combinazione lineare di v_1, \dots, v_n .

Supponiamo che il vettore v si scriva come:

$$v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$$

e come

$$v = \mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n$$

Dimostriamo che le due scritte coincidono. Sottraendo membro a membro, si ottiene:

$$(\lambda_1 - \mu_1)v_1 + \dots + (\lambda_n - \mu_n)v_n = 0 \quad (1.3.1)$$

Poiché i vettori v_1, \dots, v_n sono per ipotesi linearmente indipendenti, si conclude che i coefficienti della combinazione lineare 1.3.1 sono tutti nulli, ossia:

$$\lambda_1 = \mu_1 \quad \dots \quad \lambda_n = \mu_n$$

come si voleva dimostrare. ■

Siano $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ una base di uno spazio vettoriale V , v un vettore di V e sia

$$v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$$

l'unica espressione di v come combinazione lineare di (v_1, \dots, v_n) . I numeri $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ sono detti le *coordinate*, o le *componenti*, di v rispetto alla base \mathcal{B} . Il vettore colonna

$$[v]_{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}$$

è il *vettore delle coordinate* di v rispetto alla base \mathcal{B} .

Teorema 1.3.3 *Tutte le basi di uno spazio vettoriale hanno la stessa cardinalità.*

Non dimostriamo questo teorema.

Diremo che uno spazio vettoriale V ha *dimensione finita* se esiste un insieme finito di vettori di V che genera V . Ad esempio, \mathbb{R}^2 ha dimensione finita, perché l'insieme di vettori $\{e_1, e_2\}$ genera \mathbb{R}^2 .

Grazie al precedente teorema, ha senso la seguente definizione.

Definizione 1.3.4 *La dimensione di uno spazio vettoriale di dimensione finita è il numero di elementi di una qualsiasi base. La dimensione di V sarà denotata con $\dim V$.*

Una base per lo spazio vettoriale nullo (cioè costituito dal solo vettore zero) è l'insieme vuoto; la dimensione dello spazio vettoriale nullo è zero.

Può accadere che uno spazio vettoriale non abbia dimensione finita, vale a dire può accadere che non esista un insieme finito di vettori che lo generi. In tal caso, diremo che lo spazio *ha dimensione infinita*.

Esempio. Dimostriamo che lo spazio vettoriale $\mathbb{R}[x]$ dei polinomi a coefficienti reali nell'indeterminata x non ha dimensione finita. Infatti, consideriamo un qualunque insieme finito $S = \{p_1, \dots, p_n\}$ di polinomi di $\mathbb{R}[X]$. Diciamo h il massimo dei loro gradi. Ogni combinazione lineare di p_1, \dots, p_n , cioè ogni elemento del sottospazio vettoriale generato da S , ha grado minore o uguale ad h . Pertanto il sottospazio vettoriale generato da S non può esaurire tutto $\mathbb{R}[X]$.

1.4 Riduzione a scala

Per definizione, le *operazioni elementari sulle righe* di una matrice sono le seguenti:

1. moltiplicare una riga per un numero $\lambda \neq 0$;
2. sommare la riga i -esima alla riga j -esima ($i \neq j$);
3. scambiare di posto due righe.

Si dimostra facilmente che, data una qualunque matrice A , con una successione di opportune operazioni elementari sulle righe di A si può sempre ottenere una matrice *a scala*, cioè una matrice del tipo

$$S = \begin{vmatrix} a & * & * & * & * & * & * & * \\ & b & * & * & * & * & * & * \\ & & & & c & * & * & * \end{vmatrix}$$

Qui si intende che al posto degli spazi vuoti ci sono tutti zeri, i numeri a, b, c, \dots sono diversi da zero e al posto degli asterischi ci può essere un numero qualunque. In termini più precisi, una matrice a scala soddisfa le seguenti condizioni: *Se due righe consecutive non sono fatte interamente di zeri, allora la riga più in basso ha il suo primo elemento non nullo almeno un posto più a destra della riga di sopra. Le (eventuali) righe formate interamente da zeri sono al fondo della matrice.*

Esempi. Le seguenti matrici sono a scala:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 7 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 7 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & 1 & 3 & -2 \\ 0 & 0 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}$$

La matrice

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 3 & 7 \\ 0 & 1 & 3 \end{vmatrix}$$

non è a scala.

Scriveremo $A \simeq A'$ se la matrice A' si ottiene dalla matrice A mediante una successione di operazioni elementari sulle righe.

Esempio.

$$\left| \begin{array}{ccc|c} 1 & -2 & 0 & \\ 0 & 1 & 2 & \\ 2 & -3 & 2 & \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{ccc|c} 1 & -2 & 0 & \\ 0 & 1 & 2 & \\ 0 & 1 & 2 & \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{ccc|c} 1 & -2 & 0 & \\ 0 & 1 & 2 & \\ 0 & 0 & 0 & \end{array} \right|$$

Si dimostra facilmente la seguente

Proposizione 1.4.1 *Sia A una matrice $m \times n$ e sia S una matrice a scala ottenuta da A mediante una successione di operazioni elementari sulle righe. Siano A_1, \dots, A_m le righe di A e S_1, \dots, S_r le righe non nulle di S . Allora:*

1) *lo spazio vettoriale generato dalle righe di S è uguale allo spazio vettoriale generato dalle righe di A :*

$$L(S_1, \dots, S_r) = L(A_1, \dots, A_m)$$

2) *(S_1, \dots, S_r) è una base dello spazio $L(A_1, \dots, A_m)$ generato dalle righe di A .*

(Si veda anche l'esercizio 1.5.9)

Definizione 1.4.2 *Sia $A \in M(m \times n, \mathbb{R})$. Il rango per righe di A è la dimensione dello spazio vettoriale generato dalle righe di A . Il rango per colonne di A è la dimensione dello spazio vettoriale generato dalle colonne di A .*

Si dimostra che il rango per righe e il rango per colonne coincidono: il loro comune valore è il rango $\text{rk } A$ della matrice A (Si veda la definizione 1.13.4).

Esempio. Sia $W = L(v_1, v_2, v_3)$ il sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^4 generato dai vettori:

$$v_1 = (-1, 1, 1, 2), \quad v_2 = (1, -3, 0, -2), \quad v_3 = (0, -2, 1, 0)$$

Trovare $\dim W$ e una base di W .

Soluzione. Formiamo la matrice A che ha come righe i vettori v_1, v_2, v_3 :

$$A = \left| \begin{array}{cccc|c} -1 & 1 & 1 & 2 & \\ 1 & -3 & 0 & -2 & \\ 0 & -2 & 1 & 0 & \end{array} \right|$$

e semplifichiamola con operazioni elementari sulle righe:

$$A = \left| \begin{array}{cccc|c} -1 & 1 & 1 & 2 & \\ 1 & -3 & 0 & -2 & \\ 0 & -2 & 1 & 0 & \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc|c} -1 & 1 & 1 & 2 & \\ 0 & -2 & 1 & 0 & \\ 0 & -2 & 1 & 0 & \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc|c} -1 & 1 & 1 & 2 & \\ 0 & -2 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \end{array} \right| = S$$

In questo modo abbiamo ottenuto una matrice a scala S . Una base di W è costituita dalle due righe non nulle $(-1, 1, 1, 2)$ e $(0, -2, 1, 0)$ di S . Pertanto $\dim W = 2$.

1.5 Esercizi

Esercizio 1.5.1 Decidere se il vettore $b = \begin{vmatrix} 0 \\ 3 \\ -3 \end{vmatrix}$ di \mathbb{R}^3 è combinazione lineare dei vettori $a_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ -1 \end{vmatrix}$ e $a_2 = \begin{vmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix}$.

Soluzione. Si tratta di vedere se esistono due numeri reali, diciamo x, y , per i quali

$$\begin{vmatrix} 0 \\ 3 \\ -3 \end{vmatrix} = xa_1 + ya_2 = x \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ -1 \end{vmatrix} + y \begin{vmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x + 2y \\ 2x + y \\ -x + y \end{vmatrix}.$$

Detto altrimenti, si tratta di vedere se il sistema

$$\begin{cases} x + 2y = 0 \\ 2x + y = 3 \\ -x + y = -3 \end{cases} \quad (1.5.1)$$

di 3 equazioni in due incognite x, y ha soluzioni. Si vede facilmente che il sistema è risolubile: precisamente l'unica soluzione è $x = 2, y = -1$. Pertanto

$$\begin{vmatrix} 0 \\ 3 \\ -3 \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ -1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Per *matrice dei coefficienti* del sistema lineare 1.5.1 intendiamo la matrice:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix}$$

Si noti che la soluzione del sistema lineare 1.5.1 esprime la colonna b dei termini noti come combinazione lineare delle colonne della matrice dei coefficienti A .

Esercizio 1.5.2 Quali sono i sottospazi vettoriali dello spazio vettoriale \mathbb{R}^3 ?

Esercizio 1.5.3 L 'insieme

$$P_2 = \{a_2x^2 + a_1x + a_0, \ a_2, a_1, a_0 \in \mathbb{R}, \ a_2 \neq 0\}$$

di tutti i polinomi reali di grado 2 è uno spazio vettoriale?

Esercizio 1.5.4 Sia H l'insieme dei punti di \mathbb{R}^2 del tipo $(3s, s + 1)$, dove s è un qualunque numero reale. Stabilire se H è un sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^2 .

Esercizio 1.5.5 Sia

$$W = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x + 2y + 3z = 0\}.$$

a) Dimostrare che W è un sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^3 .

b) Trovare una base di W e la sua dimensione.

Esercizio 1.5.6 Siano v, w elementi di uno spazio vettoriale. Si dimostri che se v e w sono linearmente dipendenti e $v \neq 0$, allora w è multiplo di v , vale a dire esiste uno scalare α per il quale vale $w = \alpha v$.

Esercizio 1.5.7 Dimostrare che se i vettori v_1, v_2, v_3 sono linearmente indipendenti, allora anche i vettori v_1, v_2 sono linearmente indipendenti.

Esercizio 1.5.8 Siano $v_1 = (1, 0, 0)$, $v_2 = (0, 1, 1)$. Provare che

$$L(v_1, v_2) = L(v_1, v_2 + 2v_1).$$

Più in generale, se v_1, v_2 sono vettori qualsiasi di uno spazio vettoriale V e $\lambda \in \mathbb{R}$, allora:

$$L(v_1, v_2) = L(v_1, v_2 + \lambda v_1).$$

Esercizio 1.5.9 Si consideri la seguente matrice a scala:

$$A = \begin{vmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 3 \end{vmatrix}.$$

Si dimostri che le righe di A sono vettori linearmente indipendenti di \mathbb{R}^3 .

Più in generale, si consideri una qualunque matrice a scala A senza righe nulle; ad esempio una matrice del tipo:

$$A = \begin{vmatrix} a & * & * & * & * & * & * & * \\ & b & * & * & * & * & * & * \\ & & & c & * & * & & \end{vmatrix}$$

dove i numeri a, b, c sono diversi da zero, al posto degli spazi vuoti ci sono tutti zeri, e al posto degli asterischi ci può essere qualunque numero. Si dimostri che le righe di A sono vettori linearmente indipendenti.

Soluzione. Siano λ, μ, ν tre numeri reali per i quali

$$\lambda(3, 1, 2) + \mu(0, 2, 1) + \nu(0, 0, 3) = (0, 0, 0).$$

Scrivendo questa equazione in componenti, abbiamo:

$$\begin{aligned} 3\lambda &= 0 \\ \lambda + 2\mu &= 0 \\ 2\lambda + \mu + 3\nu &= 0 \end{aligned}$$

La prima equazione dà $\lambda = 0$. Sostituendo nella seconda equazione, si ottiene $\mu = 0$. Sostituendo ancora nella terza si ottiene anche $\nu = 0$. Quindi l'unica soluzione del sistema è $\lambda = \mu = \nu = 0$. Questo prova che le righe della matrice a scala A sono linearmente indipendenti.

La dimostrazione nel caso generale è del tutto analoga. Siano λ, μ, ν tre numeri reali per i quali:

$$\lambda (1^a \text{ riga}) + \mu (2^a \text{ riga}) + \nu (3^a \text{ riga}) = 0.$$

Scrivendo questa equazione in componenti, si ottiene un sistema lineare omogeneo nelle incognite λ, μ, ν , fra le cui equazioni figurano le seguenti:

$$\begin{aligned} a\lambda &= 0 \\ (*)\lambda + b\mu &= 0 \\ (*)\lambda + (*)\mu + c\nu &= 0 \end{aligned}$$

Poiché $a, b, c \neq 0$, l'unica soluzione è $\lambda = \mu = \nu = 0$. (Qui gli asterischi $*$ sono numeri che non importa specificare). Questo prova che le righe della matrice a scala A sono linearmente indipendenti.

Esercizio 1.5.10 Decidere se i vettori

$$v_1 = (1, 1, 1), v_2 = (1, -1, 1), v_3 = (2, 0, 2)$$

di \mathbb{R}^3 sono linearmente indipendenti o dipendenti.

Esercizio 1.5.11 Stabilire se il vettore $v = (2, 3, 1)$ di \mathbb{R}^3 appartiene allo spazio vettoriale generato dai vettori $w_1 = (1, 1, 2)$, $w_2 = (5, 7, 4)$.

Soluzione. Il vettore v appartiene al sottospazio W se e solo se $L(w_1, w_2) = L(w_1, w_2, v)$. È evidente che $\dim L(w_1, w_2) = 2$ (w_1, w_2 non sono proporzionali). Formiamo la matrice A che ha come righe w_1, w_2, v ed effettuiamo operazioni elementari sulle righe fino ad ottenere una matrice a scala:

$$A = \left| \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 5 & 7 & 4 & 0 & 2 & -6 \\ 2 & 3 & 1 & 0 & 1 & -3 \end{array} \right| \sim \left| \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & -6 & 0 & 2 & -6 \\ 0 & 1 & -3 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right| \sim \left| \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & -6 & 0 & 2 & -6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right| = S$$

Si vede allora che anche $\dim L(w_1, w_2, v) = 2$; questo prova che $L(w_1, w_2) = L(w_1, w_2, v)$ (Perché?). Quindi $v \in L(w_1, w_2)$.

Esercizio 1.5.12 Stabilire se l'insieme $S = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x + z \geq 0\}$ è un sottospazio di \mathbb{R}^3 .

Esercizio 1.5.13 Sia V lo spazio vettoriale (di dimensione infinita) di tutte le funzioni da \mathbb{R} a \mathbb{R} . Dimostrare che le funzioni \sin e \cos sono linearmente indipendenti.

Esercizio 1.5.14 Siano W_1, W_2 sottospazi di uno spazio vettoriale V . Dimostrare che l'intersezione

$$W_1 \cap W_2 = \{v \in V \mid v \in W_1 \text{ e } v \in W_2\}$$

è un sottospazio di V .

Esercizio 1.5.15 Dire se la seguente affermazione è vera o falsa, motivando la risposta:

“Siano W_1, W_2 sottospazi arbitrari di uno spazio vettoriale V . Allora l'unione insiemistica

$$W_1 \cup W_2 = \{v \in V \mid v \in W_1 \text{ oppure } v \in W_2\}$$

è un sottospazio di V .”

Esercizio 1.5.16 a) Trovare la dimensione $\dim M(2 \times 2, \mathbb{R})$ dello spazio vettoriale delle matrici reali 2×2 .

b) Trovare la dimensione dello spazio vettoriale $M(m \times n, \mathbb{R})$ delle matrici reali $m \times n$.

Esercizio 1.5.17 Sia

$$\Delta_3 = \{A \in M(3 \times 3, \mathbb{R}) \mid A_{ij} = 0 \text{ se } i \neq j\}.$$

Gli elementi di Δ_3 sono le matrici diagonali 3×3 .

Stabilire se Δ_3 è un sottospazio vettoriale di $M(3 \times 3, \mathbb{R})$. In caso affermativo, trovare $\dim \Delta_3$.

Esercizio 1.5.18 Diamo prima qualche definizione. Se A è una qualunque matrice $m \times n$, definiamo trasposta di A la matrice tA di tipo $n \times m$ la cui componente di posto i, j è:

$$({}^tA)_{ij} = A_{ji}$$

Una matrice quadrata si dice simmetrica se $A = {}^tA$; si dice antisimmetrica se $A = -{}^tA$.

Si dimostri che (rispetto alle usuali operazioni):

a) l'insieme $\mathcal{S}_n = \{A \in M(n \times n, \mathbb{R}) \mid A = {}^tA\}$ delle matrici simmetriche $n \times n$ è uno spazio vettoriale;

b) l'insieme $\mathcal{A}_n = \{A \in M(n \times n, \mathbb{R}) \mid A = -{}^tA\}$ delle matrici antisimmetriche $n \times n$ è uno spazio vettoriale.

Esercizio 1.5.19 Trovare le dimensioni dei seguenti sottospazi dello spazio vettoriale $M(n \times n, \mathbb{R})$ delle matrici reali $n \times n$:

a) Il sottospazio \mathcal{S}_n delle matrici simmetriche $\mathcal{S}_n = \{A \in M(n \times n, \mathbb{R}) \mid A = {}^t A\}$.

b) Il sottospazio \mathcal{A}_n delle matrici antisimmetriche: $\mathcal{A}_n = \{A \in M(n \times n, \mathbb{R}) \mid A = -{}^t A\}$.

Soluzione. a) Facciamoci un'idea di come vanno le cose per n piccolo. Cominciamo con $n = 1$. Le matrici reali 1×1 non sono altro che i numeri reali, e sono tutte simmetriche. Quindi $\dim \mathcal{S}_1 = 1$. Passiamo a $n = 2$. Una matrice simmetrica 2×2 si scrive:

$$A = \begin{vmatrix} a & b \\ b & c \end{vmatrix} = a \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + b \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} + c \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Vediamo allora che per assegnare una matrice simmetrica A si devono dare i numeri sulla diagonale principale e al di sopra di essa (in tutto $2 + 1 = 3$ numeri) e ogni matrice simmetrica si scrive in modo unico come combinazione lineare delle tre matrici simmetriche:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Ne segue che $\dim \mathcal{S}_2 = 3$. Affrontiamo ora il caso generale. Per assegnare una matrice A simmetrica di ordine n occorre dare, in modo arbitrario, n elementi sulla diagonale principale e tutti gli elementi al di sopra di essa. Quanto ai restanti elementi, la scelta è forzata, per simmetria. Allora per assegnare una matrice simmetrica di ordine n i parametri necessari sono:

$$1 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}.$$

Pertanto

$$\dim \mathcal{S}_n = \frac{n(n+1)}{2}.$$

(Si noti che questa formula è in accordo con quanto abbiamo trovato per $n = 1, 2$). Si scriva ora in modo esplicito una base di \mathcal{S}_3 (e si dimostri che è una base).

b) Gli elementi sulla diagonale principale di una matrice antisimmetrica sono tutti nulli. (Suggerimento: poiché per ogni $i, j = 1, \dots, n$ vale $a_{ij} = -a_{ji}$, abbiamo in particolare, per $i = j$, $a_{ii} = -a_{ii}$. Ne segue $a_{ii} = 0$, per ogni $i = 1, \dots, n$). Quindi per assegnare una matrice A antisimmetrica di ordine n occorre dare, in modo arbitrario, gli elementi al di sopra della diagonale principale, che sono in numero di

$$1 + \dots + (n-1) = \frac{n(n-1)}{2}.$$

Pertanto

$$\dim \mathcal{A}_n = \frac{n(n-1)}{2}.$$

Descriviamo esplicitamente una base di \mathcal{A}_2 e \mathcal{A}_3 . Una matrice antisimmetrica 2×2 si scrive:

$$A = \begin{vmatrix} 0 & a \\ -a & 0 \end{vmatrix} = a \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$$

Quindi una base dello spazio delle matrici antisimmetriche \mathcal{A}_2 è la matrice $\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$.

Una matrice antisimmetrica 3×3 si scrive:

$$\begin{vmatrix} 0 & a & c \\ -a & 0 & b \\ -c & -b & 0 \end{vmatrix} = a \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} + b \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} + c \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Una base di \mathcal{S}_3 è:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

1.6 Prodotto di matrici. Matrici invertibili

Il prodotto AB di due matrici A e B è definito solo se il numero di colonne di A è uguale al numero di righe di B , cioè se A è di tipo $m \times p$ e B di tipo $p \times n$. In tal caso, il prodotto AB è una matrice $m \times n$.

Cominciamo a definire il prodotto in un caso particolare. Supponiamo che A sia una matrice $1 \times n$ e che B sia una matrice $n \times 1$:

$$A = \begin{vmatrix} a_1 & \cdot & \cdot & a_n \end{vmatrix}, \quad B = \begin{vmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{vmatrix}.$$

Allora AB è la matrice 1×1 (cioè il numero) definito come segue:

$$AB = \begin{vmatrix} a_1 & \cdot & \cdot & a_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{vmatrix} = a_1 b_1 + \cdots + a_n b_n = \sum_{i=1}^n a_i b_i.$$

Veniamo ora al caso generale. Se A è di tipo $m \times p$ e B di tipo $p \times n$, allora il *prodotto* AB è la matrice $m \times n$ così definita: per ogni $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$, la componente $(AB)_{ij}$ della matrice prodotto è

$$\begin{aligned} (AB)_{ij} &= \begin{vmatrix} i\text{-esima riga di } A & j\text{-esima} \\ & \text{colonna} \\ & \text{di } B \end{vmatrix} \\ &= a_{i1}b_{1j} + \cdots + a_{ip}b_{pj} \\ &= \sum_{s=1}^p a_{is}b_{sj}. \end{aligned} \tag{1.6.1}$$

Esempio. $\begin{vmatrix} 2 & 1 & 5 \\ 1 & 3 & 2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 3 & 4 \\ -1 & 2 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 15 & 15 \\ 4 & 12 \end{vmatrix}.$

Esempio. $\begin{vmatrix} 1 & 4 & 5 \\ 3 & 1 & 2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 3 \\ 2 \\ 6 \end{vmatrix} = 41.$

Esempio. $\begin{vmatrix} 1 \\ 4 \\ 2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 12 & 4 & 8 \\ 6 & 2 & 4 \end{vmatrix}.$

Proprietà del prodotto di matrici.

1. Proprietà associativa: $(AB)C = A(BC)$

2. Proprietà distributiva:

$$A(B + C) = AB + AC \quad (B + C)A = BA + CA$$

Tutte queste proprietà seguono facilmente dalle definizioni e dalle corrispondenti proprietà dei numeri reali.

Osservazione. La composizione di funzioni non è commutativa; corrispondentemente il prodotto di matrici non è commutativo, cioè in generale $AB \neq BA$.

Esempio. Consideriamo nel piano \mathbb{R}^2 le seguenti simmetrie:

S : simmetria rispetto all'asse x , rappresentata dalla matrice

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

S' : simmetria rispetto alla bisettrice $x - y = 0$, rappresentata dalla matrice

$$B = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Il prodotto

$$AB = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$$

rappresenta una rotazione attorno all'origine di un angolo retto nel verso negativo, mentre il prodotto

$$BA = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

rappresenta una rotazione attorno all'origine di un angolo retto nel verso positivo.

Ovviamente, esistono anche matrici A, B per le quali $AB = BA$. Per esempio le potenze di A commutano: $A^r A^s = A^s A^r$, qualunque siano gli interi non negativi r, s .

Per ogni intero $n \geq 1$, la matrice identità I_n (o semplicemente I , se non c'è ambiguità) è la matrice con tutti 1 sulla diagonale principale e 0 fuori dalla diagonale. Ad esempio, la matrice identità 4×4 è

$$I_4 = I = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Definizione 1.6.1 Una matrice quadrata A è detta invertibile se esiste una matrice B per la quale $AB = BA = I$.

Una matrice B legata ad A da queste equazioni è detta inversa di A .

Vedremo in seguito che una matrice quadrata A di ordine n è invertibile se e solo se rappresenta un'applicazione lineare $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ invertibile.

Si dimostra che se una matrice è invertibile, allora l'inversa è unica (Esercizio 1.7.7).

1.7 Esercizi

Esercizio 1.7.1 Sia $A = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \end{vmatrix}$ un vettore riga e $B = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{vmatrix}$ un vettore colonna. Calcolare, se sono definiti, i prodotti AB e BA .

Soluzione. Usando la definizione di prodotto di matrici, troviamo:

$$AB = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{vmatrix} = |a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3|$$

cioè AB è la matrice 1×1 la cui unica componente è il numero $a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3$. Invece BA è di tipo 3×3 . Precisamente:

$$BA = \begin{vmatrix} b_1a_1 & b_1a_2 & b_1a_3 \\ b_2a_1 & b_2a_2 & b_2a_3 \\ b_3a_1 & b_3a_2 & b_3a_3 \end{vmatrix}$$

Esercizio 1.7.2 Sia

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 7 \\ 2 & 7 & 4 \\ 3 & 7 & 4 \end{vmatrix}$$

e siano

$$e_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad e_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad e_3 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Trovare Ae_1, Ae_2, Ae_3 . Più generale, se A è una qualunque matrice $n \times n$ e e_i è il vettore unitario standard i -esimo di \mathbb{R}^n , cioè il vettore

$$e_i = \begin{vmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{vmatrix}$$

(tutti 0 tranne 1 al posto i -esimo), che cos'è Ae_i ?

Soluzione. Troviamo:

$$Ae_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{vmatrix}, \quad Ae_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 7 \\ 7 \end{vmatrix}, \quad Ae_3 = \begin{vmatrix} 7 \\ 4 \\ 4 \end{vmatrix}.$$

Più in generale, si vede allora facilmente che se A è una qualunque matrice quadrata $n \times n$

$$Ae_i = A \begin{vmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{vmatrix} = i\text{-esima colonna di } A.$$

Esercizio 1.7.3 *Trovare una formula per la n -esima potenza*

$$\begin{vmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{vmatrix}^n$$

dove a è un numero reale e n è un qualunque numero naturale, e dimostrarla per induzione. Dare un'interpretazione geometrica.

Soluzione. Si trova

$$\begin{vmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{vmatrix}^n = \begin{vmatrix} 1 & na \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1.7.1)$$

per ogni intero non negativo n . Proviamo questa uguaglianza per induzione. L'uguaglianza è vera per $n = 0$, perché in tal caso il primo e il secondo membro sono entrambi uguali alla matrice identità. Supponiamo ora che l'uguaglianza 1.7.1 sia vera per il numero naturale n . Allora

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{vmatrix}^{n+1} &= \begin{vmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{vmatrix}^n \begin{vmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} 1 & na \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} 1 & (n+1)a \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

Si è così provato che se la formula 1.7.1 è vera per n , allora è vera anche per $n + 1$. Per induzione, possiamo concludere che la formula è vera per ogni intero $n \geq 0$.

Esercizio 1.7.4 *Supponiamo che A e B siano matrici quadrate di ordine $n \geq 2$ il cui prodotto sia nullo: $AB = 0$. Possiamo concludere che $A = 0$ oppure $B = 0$?*

Soluzione. No. Un controesempio: si considerino le due matrici

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Abbiamo $AB = 0$, ma $A \neq 0$ e $B \neq 0$.

Esercizio 1.7.5 *Siano A, B matrici quadrate $n \times n$. Dire se è vero che*

$$(A + B)^2 = A^2 + 2AB + B^2 \quad (1.7.2)$$

$$(A + B)(A - B) = A^2 - B^2 \quad (1.7.3)$$

Soluzione. Se A e B sono arbitrarie matrici $n \times n$, abbiamo:

$$\begin{aligned} (A + B)^2 &= A^2 + AB + BA + B^2 \\ (A + B)(A - B) &= A^2 - AB + BA - B^2 \end{aligned}$$

Quindi le due identità 1.7.2 e 1.7.3 sono vere se e solo se le matrici A e B commutano, vale a dire se e solo se $AB = BA$.

Esercizio 1.7.6 *Dimostrare che:*

$${}^t(AB) = {}^tB {}^tA$$

Soluzione. Diciamo che A sia di tipo $m \times q$ e B di tipo $q \times n$. Allora, per ogni $i = 1, \dots, m$, e $j = 1, \dots, n$, abbiamo:

$$\begin{aligned} ({}^t(AB))_{ij} &= (AB)_{ji} && \text{(definizione di trasposta)} \\ &= \sum_{s=1}^q A_{js} B_{si} && \text{(definizione di prodotto)} \\ &= \sum_{s=1}^q B_{si} A_{js} && \text{(proprietà commutativa dei numeri)} \\ &= \sum_{s=1}^q {}^tB_{is} {}^tA_{sj} && \text{(definizione di trasposta)} \\ &= ({}^tB {}^tA)_{ij} && \text{(definizione di prodotto)} \end{aligned}$$

Esercizio 1.7.7 Unicità dell'inversa. *Se B e B' sono due inverse di una stessa matrice A , allora $B = B'$. In altre parole, l'inversa, se esiste, è unica.*

Dimostrazione. Supponiamo che B e B' siano entrambe inverse di A :

$$AB = BA = I, \quad \text{e} \quad AB' = B'A = I.$$

Allora:

$$B = BI = B(AB') = (BA)B' = IB' = B'. \quad \blacksquare$$

Se la matrice A è invertibile, la sua inversa (unica, per quanto appena dimostrato) è denotata A^{-1} .

Esercizio 1.7.8 *Provare che la matrice $\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$ non è invertibile. Dare un'interpretazione geometrica.*

Esercizio 1.7.9 *Siano A, B matrici $n \times n$ invertibili. Dimostrare le seguenti uguaglianze:*

$$\begin{aligned} \alpha) & (AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}. \\ \beta) & ({}^tA)^{-1} = {}^t(A^{-1}). \end{aligned}$$

Soluzione. $\alpha)$ Per definizione di inversa, si deve provare $(AB)(B^{-1}A^{-1}) = I$ e $(B^{-1}A^{-1})(AB) = I$.

$$\begin{aligned} (AB)(B^{-1}A^{-1}) &= A(BB^{-1})A^{-1} && \text{(proprietà associativa)} \\ &= AIA^{-1} && \text{(definizione di inversa)} \\ &= AA^{-1} && (I \text{ è l'identità del prodotto)} \\ &= I && \text{(definizione di inversa)} \end{aligned}$$

Allo stesso modo si dimostra che $(B^{-1}A^{-1})(AB) = I$.

$\beta)$ Proviamo che $({}^tA)({}^t(A^{-1})) = I$:

$$\begin{aligned} ({}^tA)({}^t(A^{-1})) &= {}^t(A^{-1}A) && \text{(perché } {}^tB {}^tA = {}^t(AB)) \\ &= {}^tI && \text{(definizione di inversa)} \\ &= I && \text{(perché } {}^tI = I) \end{aligned}$$

■

Esercizio 1.7.10 Se A e B sono arbitrarie matrici $n \times n$ simmetriche, la matrice prodotto AB è simmetrica?

Esercizio 1.7.11 Se una matrice simmetrica è invertibile, la sua inversa è simmetrica?

Soluzione. Sì, perché

$$\begin{aligned} {}^t(A^{-1}) &= ({}^tA)^{-1} \\ &= A^{-1}. \end{aligned}$$

Esercizio 1.7.12 Quando una matrice diagonale è invertibile? E se è invertibile, quale ne è l'inversa?

Esercizio 1.7.13 Sia A una matrice $n \times n$. Per definizione, la traccia di A è il numero

$$\operatorname{tr} A = \sum_{i=1}^n a_{ii} = a_{11} + \dots + a_{nn}.$$

Dimostrare che se A e B sono arbitrarie matrici $n \times n$, allora:

$$\begin{aligned} \alpha) \quad \operatorname{tr} (A + B) &= \operatorname{tr} A + \operatorname{tr} B \\ \beta) \quad \operatorname{tr} (\lambda A) &= \lambda(\operatorname{tr} A) \\ \gamma) \quad \operatorname{tr} AB &= \operatorname{tr} BA, \end{aligned}$$

e, se B è invertibile,

$$\delta) \quad \operatorname{tr} B^{-1}AB = \operatorname{tr} A$$

Soluzione. Le identità $\alpha)$ e $\beta)$ sono di verifica immediata. Proviamo la $\gamma)$:

$$\begin{aligned} \operatorname{tr} AB &= \sum_{i=1}^n (AB)_{ii} \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^n A_{is} B_{si} \\ &= \sum_{s=1}^n \sum_{i=1}^n B_{si} A_{is} \\ &= \sum_{s=1}^n (BA)_{ss} \\ &= \operatorname{tr} BA. \end{aligned}$$

Dimostriamo ora $\operatorname{tr} B^{-1}AB = \operatorname{tr} A$:

$$\begin{aligned} \operatorname{tr} B^{-1}AB &= \operatorname{tr} (AB)B^{-1} && \text{(per la } \gamma)) \\ &= \operatorname{tr} A(BB^{-1}) \\ &= \operatorname{tr} AI \\ &= \operatorname{tr} A. \end{aligned}$$

Esercizio 1.7.14 Siano A, B, C matrici quadrate $n \times n$ arbitrarie, e sia λ un numero reale. Decidere se le seguenti affermazioni sono vere o false, motivando la risposta.

1. $AB = AC \implies B = C$.
2. $\lambda A = 0 \implies \lambda = 0$ oppure $A = 0$.
3. $A^2 = 0 \implies A = 0$.

Esercizio 1.7.15 Sia A una matrice quadrata. Dimostrare le seguenti affermazioni:

1. Se $A^2 = 0$, allora $I - A$ è invertibile.
2. Più in generale, se esiste un intero positivo n per il quale $A^n = 0$, allora $I - A$ è invertibile.

Soluzione. Se $A^2 = 0$, allora $(I - A)(I + A) = I - A^2 = I$, e quindi la matrice $I - A$ è invertibile.

Più in generale, se $A^n = 0$ per qualche intero positivo n , allora

$$(I - A)(I + A + \cdots + A^{n-1}) = I + A + \cdots + A^{n-1} - A - \cdots - A^{n-1} = I.$$

Pertanto $I - A$ è invertibile.

Esercizio 1.7.16 Siano A, B matrici quadrate $n \times n$. Dire se le seguenti affermazioni sono vere o false, motivando la risposta.

1. Se A e B sono simmetriche, allora $A + B$ è simmetrica.
2. Se A e B sono antisimmetriche, allora $A + B$ è antisimmetrica.
3. Se A e B sono simmetriche, allora AB è simmetrica.
4. Se A e B sono antisimmetriche, allora AB è antisimmetrica.

1.8 Applicazioni lineari

Definizione 1.8.1 Siano V e W spazi vettoriali reali. Un'applicazione

$$F : V \longrightarrow W$$

si dice lineare se soddisfa le seguenti proprietà:

- 1) (Additività). Per ogni v_1, v_2 in V ,

$$F(v_1 + v_2) = F(v_1) + F(v_2).$$

- 2) (Omogeneità). Per ogni λ in \mathbb{R} e per ogni v in V ,

$$F(\lambda v) = \lambda F(v).$$

Esempio. Se V è un qualunque spazio vettoriale, l'applicazione identità Id_V (o 1_V) di V , definita da

$$Id_V : V \longrightarrow V, \quad Id_V(v) = v \quad \text{per ogni } v \in V,$$

è ovviamente lineare.

Esempio. Se V e W sono spazi vettoriali, l'applicazione $V \longrightarrow W$, $v \longmapsto 0$ per ogni vettore $v \in V$, è lineare. Questa applicazione è detta *applicazione lineare nulla* da V a W e si denota con il simbolo 0 .

Vediamo come si possono rappresentare le applicazioni lineari $F : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^m$. Scriviamo il vettore colonna $X \in \mathbb{R}^n$ come combinazione lineare dei vettori della base canonica (e_1, \dots, e_n) :

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix} = x_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{pmatrix} + x_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{pmatrix} + \cdots + x_n \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix}$$

Poiché F è lineare, l'immagine $Y = F(X) \in \mathbb{R}^m$ si scrive:

$$Y = F(X) = x_1 F(e_1) + \cdots + x_n F(e_n) \quad (1.8.1)$$

Vediamo allora che per conoscere $F(X)$ basta conoscere i vettori $F(e_1), \dots, F(e_n)$. Ora $F(e_1), \dots, F(e_n)$ sono vettori di \mathbb{R}^m , che scriviamo come colonne:

$$F(e_1) = \begin{vmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{m1} \end{vmatrix} \quad \cdots \quad F(e_n) = \begin{vmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{mn} \end{vmatrix} \quad (1.8.2)$$

Se conosciamo la matrice

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{m1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{mn} \end{vmatrix}$$

(con m righe e n colonne) siamo in grado allora di ottenere l'immagine $Y = F(X)$ di un qualunque vettore $X \in \mathbb{R}^n$: da 1.8.1 e 1.8.2 segue infatti che la componente i -esima del vettore $Y = F(X)$ è data da:

$$y_i = a_{i1}x_1 + \cdots + a_{ik}x_k + \cdots + a_{in}x_n = \sum_{k=1}^n a_{ik}x_k \quad (1.8.3)$$

L'uguaglianza 1.8.3 (valida per ogni $i = 1, \dots, m$) si può scrivere, in modo più compatto, in forma matriciale. Dalla definizione generale 1.6.1 segue che il prodotto AX della matrice A (di tipo $m \times n$) per il vettore colonna $X \in \mathbb{R}^n$ è il vettore colonna di \mathbb{R}^m la cui componente i -esima è:

$$(AX)_i = a_{i1}x_1 + \cdots + a_{in}x_n = \sum_{k=1}^n a_{ik}x_k$$

Con questa notazione, possiamo concludere:

Teorema 1.8.2 *Sia $F : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^m$ un'applicazione lineare. Allora esiste un'unica matrice A di tipo $m \times n$ per la quale vale, per ogni $X \in \mathbb{R}^n$,*

$$F(X) = AX \quad (1.8.4)$$

(prodotto della matrice A per il vettore colonna X).

Se vale 1.8.4, diremo che la matrice A rappresenta l'applicazione lineare $F : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^m$ rispetto alla base canonica di \mathbb{R}^n .

Se A è una qualunque matrice $m \times n$, definiamo *moltiplicazione a sinistra* per A l'applicazione

$$L_A : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^m$$

che a ogni vettore

$$X = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{vmatrix}$$

associa il vettore di \mathbb{R}^m

$$L_A(X) = AX = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n \\ a_{21}x_1 + \cdots + a_{2n}x_n \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \cdots + a_{mn}x_n \end{pmatrix}$$

prodotto della matrice A per il vettore colonna X . (È facile verificare che l'applicazione L_A è lineare). Il teorema 1.8.2 afferma allora che ogni applicazione lineare $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ è del tipo

$$F = L_A$$

dove L_A è la moltiplicazione a sinistra per un'opportuna matrice $A \in M(m \times n)$.

Esempio. Un'applicazione $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ è lineare se e solo se è del tipo

$$F(x) = ax,$$

dove a è un qualunque numero reale.

Esempio. Un'applicazione $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ è lineare se e solo se esistono $a, b \in \mathbb{R}$ per i quali in \mathbb{R}^2 ,

$$F(x, y) = ax + by = \begin{vmatrix} a & b \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix}.$$

per ogni (x, y) .

Esempio. Le applicazioni lineari $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ sono esattamente le funzioni del tipo $F(X) = AX$,

dove $A = \begin{vmatrix} a_1 & \cdots & a_n \end{vmatrix}$ è una qualunque matrice $1 \times n$ e $X = \begin{vmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{vmatrix}$ è un vettore colonna di \mathbb{R}^n .

Le funzioni lineari da \mathbb{R}^n a \mathbb{R} sono dunque del tipo

$$F(x_1, \dots, x_n) = a_1x_1 + \cdots + a_nx_n,$$

con a_1, \dots, a_n costanti arbitrarie.

Esempio. Un'applicazione $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ è lineare se e solo se esiste una matrice $A = \begin{vmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{vmatrix}$ tale

che

$$F(t) = At = (a_1t, \dots, a_nt)$$

per ogni $t \in \mathbb{R}$.

Interpretazione cinematica (per $n = 3$): $F(t) = tA$, $t \in \mathbb{R}$, è la legge oraria di un moto rettilineo uniforme; la traiettoria è la retta del vettore A , e la velocità (costante) è il vettore A .

Si vede facilmente che se $F : V \rightarrow W$ e $G : W \rightarrow Z$ sono applicazioni lineari, l'applicazione composta $G \circ F : V \rightarrow Z$ è lineare (Si veda l'esercizio 1.9.4). Consideriamo in particolare il diagramma di applicazioni lineari:

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbb{R}^n & \xrightarrow{F} & \mathbb{R}^m \\
 & \searrow^{G \circ F} & \downarrow G \\
 & & \mathbb{R}^l
 \end{array}$$

Per il teorema 1.8.2 che ciascuna di queste tre applicazioni lineari $F, G, G \circ F$ è rappresentata da una matrice opportuna, diciamo rispettivamente $A \in M(m \times n)$, $B \in M(l \times m)$ e $C \in M(l \times n)$. Se conosciamo le matrici A e B di F e G , come possiamo costruire la matrice C che rappresenta la composizione $G \circ F$? Si vede facilmente che l'elemento C_{ij} della matrice C è dato da:

$$\begin{aligned}
 C_{ij} &= b_{i1}a_{1j} + \cdots + b_{im}a_{mj} \\
 &= \sum_{s=1}^m b_{is}a_{sj}.
 \end{aligned} \tag{1.8.5}$$

Date due matrici $B \in M(l \times m)$ e $A \in M(m \times n)$, ricordiamo che il prodotto (righe per colonne) BA è la matrice di tipo $l \times n$ la cui componente i, j è

$$\begin{aligned}
 (BA)_{ij} &= b_{i1}a_{1j} + \cdots + b_{im}a_{mj} \\
 &= \sum_{s=1}^m b_{is}a_{sj}.
 \end{aligned} \tag{1.8.6}$$

Allora concludiamo:

Proposizione 1.8.3 *Siano $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ e $G : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^l$ applicazioni lineari, rappresentate rispettivamente dalle matrici A e B (nel senso del teorema 1.8.2). Allora l'applicazione composta $G \circ F$ è rappresentata dalla matrice prodotto BA .*

Il teorema precedente giustifica il modo in cui è definito il prodotto di matrici.

Definizione 1.8.4 *Si dice che un'applicazione lineare $F : V \rightarrow W$ è un isomorfismo (lineare) o un'applicazione invertibile, se esiste un'applicazione lineare $G : W \rightarrow V$ per la quale*

$$G \circ F = 1_V \quad e \quad F \circ G = 1_W$$

Diremo che G è una inversa di F . Due spazi vettoriali V e W si dicono isomorfi se esiste almeno un isomorfismo da V a W .

Un'applicazione lineare $F : V \rightarrow W$ non può avere due inverse distinte: se $G : W \rightarrow V$ e $G' : W \rightarrow V$ sono inverse di F , allora $G = G'$:

$$G' = G' \circ 1_W = G' \circ (F \circ G) = (G' \circ F) \circ G = 1_V \circ G = G$$

Se F è invertibile, la sua (unica) inversa si denota con il simbolo F^{-1} .

Perché un'applicazione lineare $F : V \rightarrow W$ sia invertibile, è sufficiente che sia biunivoca: in tal caso infatti la sua inversa, come applicazione tra insiemi, è lineare:

Proposizione 1.8.5 *Supponiamo che un'applicazione lineare $F : V \longrightarrow W$ sia biunivoca e sia $G : W \longrightarrow V$ la sua inversa come applicazione tra insiemi. Allora anche G è lineare e quindi F è un isomorfismo lineare.*

Dimostrazione. Siano $w_1, w_2 \in W$. Poiché F è biunivoca, esistono e sono unici due vettori $v_1, v_2 \in V$ tali che $F(v_1) = w_1$ e $F(v_2) = w_2$. Allora $w_1 + w_2 = F(v_1) + F(v_2) = F(v_1 + v_2)$. Applicando G :

$$G(w_1 + w_2) = G(F(v_1 + v_2)) = v_1 + v_2 = G(w_1) + G(w_2)$$

Questo prova che G è additiva. In modo analogo si dimostra che G è omogenea. ■

Un isomorfismo $F : V \longrightarrow V$ si dice *automorfismo*.

Esempio. Sia $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ una base di V e sia

$$x_1 v_1 + \dots + x_n v_n \xrightarrow{[-]_{\mathcal{B}} : V \longrightarrow \mathbb{R}^n} [v]_{\mathcal{B}} = {}^t(x_1, \dots, x_n) \quad (1.8.7)$$

l'applicazione che a ogni vettore $v = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n$ di V associa la n -upla $[v]_{\mathcal{B}} = (x_1, \dots, x_n)$ delle sue coordinate rispetto alla base \mathcal{B} . L'applicazione $[-]_{\mathcal{B}}$ è un isomorfismo lineare [Esercizio]. In questo modo abbiamo dimostrato che *ogni spazio vettoriale reale di dimensione n è isomorfo a \mathbb{R}^n* .

Esempio. Lo spazio vettoriale $M(m \times n, \mathbb{R})$ delle matrici reali $m \times n$ è isomorfo a \mathbb{R}^{mn} . Trovare due diversi isomorfismi tra questi spazi.

Esempio. L'applicazione lineare $M(m \times n, \mathbb{R}) \longrightarrow M(n \times m, \mathbb{R}), A \mapsto {}^t A$, è un isomorfismo.

Proposizione 1.8.6 *Siano V e W spazi vettoriali e sia (v_1, \dots, v_n) una qualunque base di V . Allora per ogni n -pla ordinata (w_1, \dots, w_n) di vettori in W esiste un'unica applicazione lineare $F : V \longrightarrow W$ per la quale $F(v_i) = w_i, i = 1, \dots, n$.*

Dimostrazione. Unicità. Supponiamo che $F : V \longrightarrow W$ sia una qualsiasi applicazione lineare soddisfacente $F(v_i) = w_i, i = 1, \dots, n$. Ogni vettore v di V si scrive come $v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$ (usiamo il fatto che i vettori v_1, \dots, v_n generano V). Dunque:

$$\begin{aligned} F(v) &= F(\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n) \\ &= \lambda_1 F(v_1) + \dots + \lambda_n F(v_n) \quad \text{perché } F \text{ è lineare} \\ &= \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_n w_n \quad \text{per le ipotesi } F(v_i) = w_i \end{aligned}$$

L'immagine $F(v)$ di un qualunque vettore $v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$ è dunque forzata ad essere $\lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_n w_n$. Ne segue che la definizione stessa di F è forzata: di applicazione lineari F soddisfacenti $F(v_i) = w_i, i = 1, \dots, n$ ne esiste al più una.

Esistenza. Per quanto visto sopra, la scelta è obbligata: per provare l'esistenza di un'applicazione lineare $F : V \longrightarrow W$ con i requisiti richiesti, poniamo, per ogni $v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$,

$$F(v) = \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_n w_n$$

Poiché il modo di scrivere v come combinazione lineare dei vettori (v_1, \dots, v_n) è unico, in questo modo si viene veramente a definire una funzione. È ora facile verificare che l'applicazione F così definita è lineare e che $F(v_i) = w_i$, $i = 1, \dots, n$. ■

Il teorema precedente afferma che per definire un'applicazione lineare $F : V \rightarrow W$ basta definire, *in modo del tutto arbitrario*, le immagini $F(v_i)$ dei vettori di una qualunque base (v_1, \dots, v_n) di V . Ad esempio, è sensato dire: “Sia $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare *definita* da $F(1,0)=(1,0,2)$ e $F(0,1)=(1,1,3)$ ”, perché $(1,0), (0,1)$ è una base di \mathbb{R}^2 . Esplicitamente, quale sarà l'immagine di un qualunque vettore (x,y) in \mathbb{R}^2 ? Come nella dimostrazione del teorema, scriviamo (x,y) come combinazione lineare dei vettori della base assegnata: $(x,y) = x(1,0) + y(0,1)$. Allora

$$\begin{aligned} F(x,y) &= F(x(1,0) + y(0,1)) &= xF(1,0) + yF(0,1) \\ &= x(1,0,2) + y(1,1,3) &= (x+y, y, 2x+3y) \end{aligned}$$

1.9 Esercizi

Esercizio 1.9.1 *Dimostrare che se $F : V \rightarrow W$ è lineare, allora $F(0) = 0$.*

(Suggerimento: $F(0) = F(0+0) = \dots$)

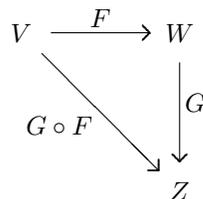
Esercizio 1.9.2 *Dire quali delle seguenti funzioni $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ sono lineari.*

- a) $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $F(x) = 2x + 1$;
- b) $G : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $G(x) = 0$;
- c) $H : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $H(x) = -3x$.

Esercizio 1.9.3 *Dire quali delle seguenti funzioni $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ sono lineari.*

- a) $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $F(x,y) = 2x$;
- b) $G : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $G(x,y) = xy$;
- c) $H : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $H(x,y) = 3x + 5y$.

Esercizio 1.9.4 *Dimostrare che se $F : V \rightarrow W$ e $G : W \rightarrow Z$ sono applicazioni lineari, allora l'applicazione composta $G \circ F : V \rightarrow Z$ è lineare.*



Dimostrazione. Siano v_1, v_2 vettori arbitrari in V

$$\begin{aligned} (G \circ F)(v_1 + v_2) &= G(F(v_1 + v_2)) && \text{per definizione di } G \circ F \\ &= G(F(v_1) + F(v_2)) && \text{perché } F \text{ è additiva} \\ &= G(F(v_1)) + G(F(v_2)) && \text{perché } G \text{ è additiva} \\ &= (G \circ F)(v_1) + (G \circ F)(v_2) && \text{per definizione di } G \circ F \end{aligned}$$

Questo prova che l'applicazione composta $G \circ F$ è additiva. In modo del tutto analogo si prova che $G \circ F$ è omogenea, e quindi lineare.

Esercizio 1.9.5 Dire se esiste un'applicazione lineare $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ per la quale si abbia $F(1,0) = (2,0)$, $F(0,-1) = (0,2)$, $F(2,-3) = (3,7)$.

Soluzione. I due vettori $(1,0)$ e $(0,-1)$ sono linearmente indipendenti. Allora esiste un'unica applicazione lineare $\varphi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ soddisfacente le prime due condizioni: $\varphi(1,0) = (2,0)$, $\varphi(0,-1) = (0,2)$. Dobbiamo controllare se $\varphi(2,-3) = (3,7)$. Scriviamo il vettore $(2,-3)$ in termini della base $(1,0), (0,-1)$:

$$(2,-3) = 2(1,0) + 3(0,-1).$$

Allora, poiché φ è lineare,

$$\varphi(2,-3) = 2\varphi(1,0) + 3\varphi(0,-1) = 2(2,0) + 3(0,2) = (4,6).$$

Pertanto non esiste alcuna applicazione lineare soddisfacente le condizioni richieste.

Esercizio 1.9.6 Sia $T : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare definita da $T(1,0,0) = (2,0,0)$, $F(0,1,0) = (1,2,1)$, $F(1,1,1) = (1,0,2)$. Trovare $T(2,3,1)$.

1.10 Applicazioni lineari e matrici

In questa sezione consideriamo solo spazi vettoriali di dimensione finita. Dimostreremo che, dati due spazi vettoriali (finito-dimensionali) V e W , con $\dim V = n$ e $\dim W = m$, la scelta di una base \mathcal{B} in V e di una base \mathcal{C} in W definisce un isomorfismo tra lo spazio vettoriale $\text{hom}(V, W)$ delle applicazioni lineari da V a W e lo spazio vettoriale $\mathcal{M}(m \times n)$. Tale isomorfismo dipende dalla scelta delle basi.

1.10.1 Matrice associata a un'applicazione lineare

Sia $F : V \rightarrow W$ un'applicazione lineare. Fissiamo una base $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ di V e una base $\mathcal{B}' = (w_1, \dots, w_m)$ di W . Scriviamo ogni immagine $F(v_1), \dots, F(v_n)$ come combinazione lineare dei vettori della base \mathcal{B}' :

$$\begin{aligned} F(v_1) &= a_{11}w_1 + a_{21}w_2 + \dots + a_{m1}w_m \\ F(v_2) &= a_{12}w_1 + a_{22}w_2 + \dots + a_{m2}w_m \\ &\dots = \dots \\ F(v_n) &= a_{1n}w_1 + a_{2n}w_2 + \dots + a_{mn}w_m \end{aligned}$$

Associamo all'applicazione lineare F la seguente matrice $m \times n$:

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdot & \cdot & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdot & \cdot & a_{mn} \end{pmatrix}$$

Si noti che la matrice $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F)$ viene costruita, per colonne, nel modo seguente:

colonna 1 = coordinate di $F(v_1)$ rispetto alla base \mathcal{B}'

colonna 2 = coordinate di $F(v_2)$ rispetto alla base \mathcal{B}'

.....

colonna n = coordinate di $F(v_n)$ rispetto alla base \mathcal{B}'

Diremo che $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F)$ è la matrice che rappresenta l'applicazione lineare F rispetto alle basi \mathcal{B} (del dominio) e \mathcal{B}' (del codominio).

Al prossimo teorema, premettiamo un'osservazione. Dati due qualunque spazi vettoriali V e W , l'insieme $\text{hom}(V, W)$ di tutte le applicazioni lineari da V a W è dotato in modo naturale di una struttura di spazio vettoriale: la somma di due applicazioni lineari $F, G \in \text{hom}(V, W)$ e la moltiplicazione di un numero λ per $F \in \text{hom}(V, W)$ sono definite ponendo:

$$(F + G)(v) = F(v) + G(v), \quad (\lambda F)(v) = \lambda F(v)$$

per ogni $v \in V$ e per ogni numero λ .

Teorema 1.10.1 *Fissate una base $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ di V e una base $\mathcal{B}' = (w_1, \dots, w_m)$ di W , l'applicazione*

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(-) : \text{hom}(V, W) \longrightarrow \mathcal{M}(m \times n), \quad F \longmapsto M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F) \quad (1.10.1)$$

che a ogni applicazione lineare F associa la matrice che la rappresenta rispetto alle basi fissate, è un isomorfismo di spazi vettoriali.

Dunque $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(-)$ è una bigezione per la quale valgono

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F + G) = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F) + M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(G)$$

e

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\lambda F) = \lambda M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F)$$

per ogni F, G in $\text{hom}(V, W)$ e per ogni numero λ .

Se poi $V = W$ e si sceglie $\mathcal{B} = \mathcal{B}'$, anziché $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F)$ si scrive più semplicemente $M_{\mathcal{B}}(F)$.

Osservazione. Si ricordi che la matrice $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F)$ dipende dalla scelta delle basi \mathcal{B} e \mathcal{B}' .

Proposizione 1.10.2 *Siano $F : V \longrightarrow W$ un'applicazione lineare, \mathcal{B} una base di V e \mathcal{B}' una base di W . Per ogni vettore v di V , denotiamo con*

$$[v]_{\mathcal{B}} = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_n \end{vmatrix}$$

le sue coordinate rispetto alla base \mathcal{B} . Allora il vettore colonna

$$[F(v)]_{\mathcal{B}'} = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ y_m \end{vmatrix}$$

delle coordinate di $F(v)$ rispetto alla base \mathcal{B}' di W è dato dal prodotto (di matrici):

$$[F(v)]_{\mathcal{B}'} = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F) [v]_{\mathcal{B}} \quad (1.10.2)$$

■

(La dimostrazione è lasciata come esercizio.)

Esempio. $V = W = \mathbb{R}^2$, $F = \rho_\vartheta : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ la rotazione di un angolo ϑ attorno all'origine. Fissiamo $\mathcal{B} = \mathcal{B}' = (e_1, e_2)$ (base canonica di \mathbb{R}^2). Allora

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F) = M_{(e_1, e_2)}(F) = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{vmatrix}$$

Se si ruota il vettore $v = (x, y)$ di \mathbb{R}^2 di un angolo ϑ si ottiene il vettore $\rho_\vartheta(v)$ le cui coordinate (rispetto alla base canonica) sono date dal prodotto

$$\begin{vmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x \cos \vartheta - y \sin \vartheta \\ x \sin \vartheta + y \cos \vartheta \end{vmatrix}$$

Siano $F : V \rightarrow W$ e $G : W \rightarrow Z$ applicazioni lineari e $G \circ F$ la loro composizione:

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{F} & W \\ & \searrow G \circ F & \downarrow G \\ & & Z \end{array}$$

Fissiamo le basi $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ di V , $\mathcal{B}' = (w_1, \dots, w_m)$ di W e $\mathcal{B}'' = (z_1, \dots, z_l)$ di Z . Allora, esattamente come in 1.8.3, si dimostra:

Proposizione 1.10.3 *La matrice che rappresenta l'applicazione composta $G \circ F$ è il prodotto delle matrici che rappresentano G e F :*

$$M_{\mathcal{B}''}^{\mathcal{B}}(G \circ F) = M_{\mathcal{B}''}^{\mathcal{B}'}(G) M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(F) \quad (1.10.3)$$

Corollario 1.10.4 *Sia V uno spazio vettoriale di dimensione finita e siano $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ sue basi. Allora*

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) = I = M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V)$$

(1_V è l'identità di V ; I è la matrice identità).

Ne segue che $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V)$ è invertibile e

$$[M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V)]^{-1} = M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) \quad (1.10.4)$$

Dimostrazione. Basta utilizzare il precedente teorema, prendendo $U = V = W$, $F = G = 1_V$, e osservando che, per ogni base \mathcal{B} , $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(1_V) = I$. \blacksquare

1.10.2 Cambio di base

A) Come cambia la matrice di un operatore quando cambia la base

Si tratta di un'immediata conseguenza del teorema 1.10.3.

Proposizione 1.10.5 *Sia $F : V \longrightarrow V$ un operatore di uno spazio vettoriale di dimensione finita V e siano \mathcal{B} e \mathcal{B}' basi di V . Allora*

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(F) = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) = [M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V)]^{-1} M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) \quad (1.10.5)$$

Dimostrazione. Si applichi due volte il teorema 1.10.3:

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(1_V) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(F) = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(F)$$

(Si ricordi che $F \circ 1_V = F = 1_V \circ F$). ■

Semplifichiamo le notazioni: posto $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F) = A$, $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(F) = A'$ e $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) = P$, il legame fra A e A' è

$$A' = P^{-1}AP \quad (1.10.6)$$

Si dice che una matrice A' è *simile*, o *coniugata*, a una matrice A quando esiste una matrice invertibile P per la quale valga l'uguaglianza 1.10.6. Abbiamo dunque dimostrato che *due matrici che rappresentano uno stesso operatore rispetto a due basi diverse sono simili*.

Esempio. Sia $V = \mathbb{R}^2$ e $\sigma : \mathbb{R}^2 \longrightarrow \mathbb{R}^2$ la simmetria rispetto alla bisettrice $x - y = 0$. Sia $\mathcal{B} = (e_1, e_2)$ la base canonica di \mathbb{R}^2 e $\mathcal{B}' = (e'_1, e'_2)$ dove

$$e'_1 = (1, 1) = e_1 + e_2, \quad e'_2 = (1, -1) = e_1 - e_2$$

Allora

$$M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(\sigma) = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \quad M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(1_V) = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}$$

Per trovare $[M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V)]^{-1} = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V)$ basta esprimere (e_1, e_2) in termini di (e'_1, e'_2) :

$$e_1 = 1/2e'_1 + 1/2e'_2 \quad e_2 = 1/2e'_1 - 1/2e'_2$$

Quindi:

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V) = \begin{vmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & -1/2 \end{vmatrix}$$

Ne segue:

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(\sigma) = \begin{vmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & -1/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}^{-1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

B) Come cambiano le coordinate di un vettore quando cambia la base

Proposizione 1.10.6 *Sia V uno spazio vettoriale, e siano \mathcal{B} e \mathcal{B}' due basi di V . Allora, per ogni vettore v in V ,*

$$[v]_{\mathcal{B}'} = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V) [v]_{\mathcal{B}} \quad (1.10.7)$$

Dimostrazione. Si ponga, nel teorema 1.10.2, $V = W$ e $F = 1_V$.

Esempio. Siano $V = \mathbb{R}^2$, $\mathcal{B} = ((1, 0), (0, 1)) = (e_1, e_2)$ la base canonica, $\mathcal{B}' = (e'_1, e'_2)$ la base ottenuta ruotando la base \mathcal{B} di un angolo ϑ . Questo significa che:

$$\begin{aligned} e'_1 &= \cos \vartheta e_1 + \sin \vartheta e_2 \\ e'_2 &= -\sin \vartheta e_1 + \cos \vartheta e_2 \end{aligned}$$

La matrice dell'identità 1_V dalla base \mathcal{B}' alla base \mathcal{B} è

$$M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{vmatrix}$$

e la sua inversa è

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V) = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{vmatrix}$$

Ora sia $v = (x, y)$ un qualunque vettore di \mathbb{R}^2 . Allora le \mathcal{B} -coordinate di v sono

$$[v]_{\mathcal{B}} = \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix}$$

mentre le \mathcal{B}' -coordinate dello stesso vettore v sono

$$[v]_{\mathcal{B}'} = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V) [v]_{\mathcal{B}} = \begin{vmatrix} x \cos \vartheta + y \sin \vartheta \\ -x \sin \vartheta + y \cos \vartheta \end{vmatrix}$$

1.11 Esercizi

Esercizio 1.11.1 In uno spazio vettoriale V di dimensione due, sono date due basi $\mathcal{B} = (e_1, e_2)$ e $\mathcal{B}' = (e'_1, e'_2)$, soddisfacenti:

$$\begin{aligned} e'_1 &= e_1 + e_2 \\ e'_2 &= e_1 - e_2. \end{aligned}$$

Dato un vettore $v \in V$, siano (x, y) le sue coordinate nella base \mathcal{B} e (x', y') le sue coordinate nella base \mathcal{B}' . Esprimere x, y in funzione di x', y' e viceversa.

Soluzione. La matrice $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V)$ che rappresenta l'identità $1_V : V \rightarrow V$ rispetto alle basi \mathcal{B}' (nel dominio) e \mathcal{B} (nel codominio), è

$$M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}.$$

(La prima colonna dà le componenti di $1_V(e'_1) (= e'_1)$ nella base \mathcal{B} ; la seconda colonna dà le componenti di $1_V(e'_2) (= e'_2)$ nella base \mathcal{B}).

Posto:

$$X = \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix}, \quad X' = \begin{vmatrix} x' \\ y' \end{vmatrix},$$

si ha:

$$X = M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(1_V) X', \quad \text{cioè} \quad \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x' \\ y' \end{vmatrix}.$$

Esplicitamente:

$$\begin{cases} x &= x' + y' \\ y &= x' - y' \end{cases}.$$

Risolvendo rispetto a x', y' si ottiene:

$$\begin{cases} x' &= \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}y \\ y' &= \frac{1}{2}x - \frac{1}{2}y \end{cases} .$$

Esercizio 1.11.2 Nello spazio vettoriale V di dimensione tre è data una base (v_1, v_2, v_3) , rispetto alla quale le coordinate sono denotate x, y, z . Dire se la trasformazione lineare omogenea

$$x = 2x' - y', \quad y = x' + y', \quad z = x' + y' - z', \quad (1.11.1)$$

si può interpretare come legame tra le coordinate x, y, z e coordinate x', y', z' rispetto a un'opportuna base (v'_1, v'_2, v'_3) . In caso affermativo, esprimere i vettori v_1, v_2, v_3 in termini dei vettori v'_1, v'_2, v'_3 , e viceversa.

Soluzione. Posto $X = \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix}$, $X' = \begin{vmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{vmatrix}$, la trasformazione 1.11.1 si scrive, in forma matriciale, $X = AX'$, dove

$$A = \begin{vmatrix} 2 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} .$$

Esercizio 1.11.3 Si consideri la base $\mathcal{B}' = ((1, 1, 0), (-1, 1, 0), (0, 0, 1))$ di \mathbb{R}^3 e sia v il vettore di coordinate $(1, 2, 0)$ rispetto alla base canonica \mathcal{B} di \mathbb{R}^3 . Trovare le coordinate di v rispetto alla base \mathcal{B}' .

Soluzione. Le coordinate $[v]_{\mathcal{B}'}$ di v rispetto alla base \mathcal{B}' si ottengono dalle coordinate

$$[v]_{\mathcal{B}} = \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{vmatrix}$$

dello stesso v rispetto alla base canonica \mathcal{B} nel modo seguente:

$$\begin{aligned} [v]_{\mathcal{B}'} &= M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_{\mathbb{R}^3})[v]_{\mathcal{B}} \\ &= \begin{vmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 \\ -1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3/2 \\ 1/2 \\ 0 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

1.12 Somme di sottospazi. Formula di Grassmann

Definizione 1.12.1 Sia V uno spazio vettoriale e siano U_1, U_2 sottospazi di V . La somma di U_1 e U_2 è

$$U_1 + U_2 = \{v \in V \mid \exists u_1 \in U_1, \exists u_2 \in U_2 \quad v = u_1 + u_2\}$$

In altri termini, $U_1 + U_2$ è costituito da tutti i vettori v in V che si scrivono come $v = u_1 + u_2$ per qualche $u_1 \in U_1$ e qualche $u_2 \in U_2$.

Esercizio. Si dimostri che $U_1 + U_2$ è un sottospazio vettoriale di V .

Esercizio. Si dimostri che $U_1 + U_2$ è il più piccolo sottospazio di V che contiene sia U_1 che U_2 , nel senso seguente:

- 1) $U_1 + U_2$ contiene sia U_1 che U_2 ;
- 2) se W è un qualunque sottospazio di V che contiene sia U_1 che U_2 , allora $U_1 + U_2 \subseteq W$.

Esempio. Sia V uno spazio vettoriale di dimensione tre, U_1 un sottospazio di dimensione 1 (una retta passante per l'origine) e U_2 un sottospazio di dimensione due (un piano passante per l'origine). Allora:

$$U_1 + U_2 = \begin{cases} V & \text{se } U_1 \not\subseteq U_2, \\ U_2 & \text{se } U_1 \subseteq U_2. \end{cases}$$

Esempio. Sia V uno spazio vettoriale di dimensione tre e siano U_1, U_2 due sottospazi di dimensione uno (cioè due rette di V , ovviamente passanti per l'origine). Allora:

$$U_1 + U_2 = \begin{cases} \text{il piano contenente } U_1 \text{ e } U_2 & \text{se } U_1 \neq U_2, \\ U_1 & \text{se } U_1 = U_2. \end{cases}$$

Teorema 1.12.2 (Formula di Grassmann) *Se U_1, U_2 sono sottospazi (di dimensione finita) di V , allora*

$$\dim(U_1 + U_2) + \dim(U_1 \cap U_2) = \dim U_1 + \dim U_2 \quad (1.12.1)$$

Non dimostriamo questo teorema. Ci limitiamo a notare un'analogia: se $A, B \subseteq X$ sono sottoinsiemi (finiti) di un qualunque insieme X , allora:

$$|A \cup B| + |A \cap B| = |A| + |B|$$

Definizione 1.12.3 *Sia V uno spazio vettoriale e siano U, U' sottospazi di V . Si dice che V è somma diretta di U e U' , e si scrive:*

$$V = U \oplus U'$$

se ogni vettore $v \in V$ si scrive in modo unico come $v = u + u'$ con $u \in U$ e $u' \in U'$.

Esercizio. Dimostrare che $V = U \oplus U'$ se e solo se:

- 1) $V = U + U'$;
- 2) $U \cap U' = 0$ (Sottospazio nullo, costituito dal solo vettore 0).

Esempio. Siano $V = \mathbb{R}^3$, $U = L(e_1, e_2)$ e $U' = L(e_3)$. Allora $V = U \oplus U'$. Infatti

$$L(e_1, e_2) + L(e_3) = L(e_1, e_2, e_3) = \mathbb{R}^3$$

e

$$L(e_1, e_2) \cap L(e_3) = \{(x, y, 0), x, y \in \mathbb{R}\} \cap \{(0, 0, z), z \in \mathbb{R}\} = \{(0, 0, 0)\}$$

Esempio. Siano $V = \mathbb{R}^3$, $U = L(e_1, e_2)$ e $U' = L(e_2, e_3)$. Allora V non è somma diretta di U e U' : infatti $V = U + U'$, ma $U \cap U' = L(e_2) \neq 0$.

Si noti che se $V = U \oplus U'$, allora

$$\dim U + \dim U' = \dim V \quad (1.12.2)$$

Infatti per la formula di Grassmann 1.12.1:

$$\dim V = \dim U + \dim U' - \dim(U \cap U') = \dim U + \dim U'$$

perché $U \cap U' = 0$. ■

1.13 Nucleo e immagine

Definizione 1.13.1 Sia $F : V \longrightarrow W$ un'applicazione lineare. Il nucleo $\text{Ker } F$ di F è il sottospazio di V :

$$\text{Ker } F = \{v \in V \mid F(v) = 0\}$$

L'immagine $\text{Im } F$ di F è il sottospazio di W :

$$\text{Im } F = \{w \in W \mid \exists v \in V \quad F(v) = w\}$$

La verifica del fatto che $\text{Ker } F$ è un sottospazio di V e $\text{Im } F$ è un sottospazio di W è lasciata come esercizio (Si veda 1.14.4).

Esempio. Sia $L_A : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^m$ la moltiplicazione a sinistra per una matrice A di tipo $m \times n$: $L_A(X) = AX$, per ogni vettore colonna X in \mathbb{R}^n . Allora il nucleo

$$\text{Ker } L_A = \{X \in \mathbb{R}^n \mid AX = 0\}$$

è semplicemente il sottospazio delle soluzioni del sistema omogeneo $AX = 0$. Il sottospazio $\text{Ker } L_A$, denotato anche più semplicemente $\text{Ker } A$, è chiamato *nucleo della matrice A* .

L'immagine

$$\text{Im } L_A = \{b \in \mathbb{R}^m \mid \exists X \in \mathbb{R}^n \quad AX = b\}$$

è l'insieme dei vettori (colonna) b in \mathbb{R}^m per i quali il sistema lineare $AX = b$ è risolubile (cioè, ha almeno una soluzione).

Esempio. Sia $P : \mathbb{R}^3 \longrightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare definita da $P(x, y, z) = (x, y, 0)$. (P associa a ogni vettore (x, y, z) di \mathbb{R}^3 la sua proiezione ortogonale sul piano $z = 0$.) Allora

$$\text{Ker } P = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x = y = 0\} = \{(0, 0, z), \quad z \in \mathbb{R}\}$$

$$\text{Im } P = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid z = 0\} = \{(x, y, 0), \quad x, y \in \mathbb{R}\}$$

In altre parole, $\text{Ker } P$ è l'asse z e $\text{Im } P$ è il piano $z = 0$. Si noti che questo esempio è un caso particolare del precedente: moltiplicazione a sinistra per una matrice (quale?).

Esempio. Siano a, b, c tre numeri reali, almeno uno dei quali diverso da zero, e sia $F : \mathbb{R}^3 \longrightarrow \mathbb{R}$ l'applicazione lineare definita da $F(x, y, z) = ax + by + cz$, per ogni $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$. Allora $\text{Ker } F$ è il sottospazio vettoriale (di dimensione due) delle soluzioni dell'equazione $ax + by + cz = 0$, ossia è un piano passante per l'origine. L'immagine $\text{Im } F$ è \mathbb{R} .

Teorema 1.13.2 Un'applicazione lineare $F : V \longrightarrow W$ è iniettiva se e solo se $\text{Ker } F = 0$.

(Come al solito 0 denota il sottospazio nullo, vale a dire il sottospazio che contiene solo il vettore nullo.)

Dimostrazione. Supponiamo che F sia iniettiva (Questo significa, per definizione: Per ogni x, y in V , se $F(x) = F(y)$, allora $x = y$). Sia $x \in \text{Ker } F$. Si ha dunque: $F(x) = 0 = F(0)$. Dall'ipotesi di iniettività, segue allora $x = 0$.

Viceversa, supponiamo $\text{Ker } F = 0$. Siano x, y in V tali che $F(x) = F(y)$, ossia, in modo equivalente, tali che $F(x - y) = 0$. Quest'ultima condizione equivale a dire $x - y \in \text{Ker } F$. Ma $\text{Ker } F = 0$, quindi $x - y = 0$, ossia $x = y$. ■

Sia A una qualunque matrice $m \times n$ e indichiamo con e_1, \dots, e_n i vettori della base canonica di \mathbb{R}^n . L'ordinario prodotto righe per colonne mostra che il vettore colonna

$$Ae_j = A^j$$

è la j -esima colonna di A . Di conseguenza, se denotiamo con

$$L_A : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^m, \quad L_A(X) = AX$$

la moltiplicazione a sinistra per la matrice A , per ogni vettore $X = x_1e_1 + \dots + x_n e_n$ di \mathbb{R}^n

$$AX = L_A(X) = x_1A^1 + \dots + x_nA^n$$

Abbiamo così dimostrato:

Proposizione 1.13.3 *Per ogni matrice A di tipo $m \times n$, l'immagine dell'applicazione lineare L_A è il sottospazio di \mathbb{R}^m generato dalle colonne di A .*

Definizione 1.13.4 *Il rango di un'applicazione lineare $F : V \longrightarrow W$, denotato $\text{rk } F$, è la dimensione dell'immagine di F :*

$$\text{rk } F = \dim \text{Im } F$$

Il rango di una matrice A , denotato $\text{rk } A$, è il rango dell'applicazione lineare L_A (moltiplicazione a sinistra per A); in modo equivalente, il rango di A è la dimensione del sottospazio generato dalle colonne di A :

$$\text{rk } A = \dim \text{Im } L_A$$

Sia $F : V \longrightarrow W$ un'applicazione lineare. La *nullità* di F è la dimensione di $\text{Ker } F$.

Teorema 1.13.5 (Nullità+Rango) *Sia $F : V \longrightarrow W$ un'applicazione lineare, con V di dimensione finita. Allora:*

$$\dim \text{Ker } F + \dim \text{Im } F = \dim V \tag{1.13.1}$$

Non diamo la dimostrazione del teorema 1.13.5. Vediamone una conseguenza:

Teorema 1.13.6 *Sia $F : V \longrightarrow W$ un'applicazione lineare e supponiamo $\dim V = \dim W$. Allora le seguenti proprietà sono equivalenti:*

- 1) F è iniettiva;
- 2) F è suriettiva;
- 3) F è un isomorfismo.

Dimostrazione. Poniamo $\dim V = \dim W = n$. Allora:

$$\begin{aligned} F \text{ iniettiva} &\iff \dim \text{Ker } F = 0 \\ &\iff \dim \text{Im } F = \dim V \quad (\text{per l'uguaglianza 1.13.1}) \\ &\iff \dim \text{Im } F = \dim W \quad (\text{perché } \dim V = \dim W) \\ &\iff F \text{ suriettiva} \end{aligned}$$

■

Teorema 1.13.7 *Una matrice quadrata A di ordine n è invertibile se e solo se $\text{rk } A = n$.*

Dimostrazione. Sia $L_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ l'operatore associato alla matrice A (cioè la moltiplicazione a sinistra per la matrice A). La matrice A è invertibile se e solo se L_A è un isomorfismo. Per il teorema precedente, L_A è un isomorfismo se e solo se L_A è suriettivo, cioè se e solo se $\text{rk } A = \dim L_A = n$. ■

1.14 Esercizi

Esercizio 1.14.1 *Dimostrare che ogni matrice quadrata si scrive, in modo unico, come somma di una matrice simmetrica di una matrice antisimmetrica. In altri termini, dimostrare che*

$$M(n \times n) = \mathcal{S}_n \oplus \mathcal{A}_n$$

Dimostrazione. Una qualsiasi matrice quadrata A si può scrivere come somma

$$A = \frac{A + {}^t A}{2} + \frac{A - {}^t A}{2}$$

della matrice simmetrica $\frac{A + {}^t A}{2}$ e della matrice antisimmetrica $\frac{A - {}^t A}{2}$.

Proviamo l'unicità di tale scrittura. Supponiamo dunque che A si scriva come

$$A = A_1 + A_2, \quad A = A'_1 + A'_2, \quad (1.14.1)$$

dove A_1, A'_1 sono simmetriche, e A_2, A'_2 sono antisimmetriche. Dalle equazioni 1.14.1 segue l'uguaglianza

$$A'_1 - A_1 = A_2 - A'_2. \quad (1.14.2)$$

Ora $A'_1 - A_1$ è simmetrica, e $A_2 - A'_2$ antisimmetrica; poiché sono uguali, $A'_1 - A_1$ e $A_2 - A'_2$ sono allora al tempo stesso simmetriche e antisimmetriche, e quindi nulle: $A'_1 - A_1 = 0$ e $A'_2 - A_2 = 0$. Pertanto $A'_1 = A_1$ e $A'_2 = A_2$. ■

Esercizio 1.14.2 *Si considerino i sottospazi di \mathbb{R}^3*

$$U = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x + 2y - z = 0\}, \quad W = L(w), \quad w = (1, 0, 1)$$

Trovare $\dim(U + W)$ e una base di $U + W$.

Esercizio 1.14.3 Si considerino i sottospazi di \mathbb{R}^4

$$U = \{(x, y, z, t) \in \mathbb{R}^4 \mid x - t = 0\}, \quad W = L(w), \quad w = (1, 0, 1, 1)$$

Trovare: $\dim U$, $\dim W$, $\dim(U + W)$, $\dim U \cap W$.

Esercizio 1.14.4 Sia $F : V \rightarrow W$ un'applicazione lineare. Dimostrare:

- a) il sottoinsieme $\text{Ker } F = \{v \in V \mid F(v) = 0\}$ è un sottospazio vettoriale di V ;
 b) il sottoinsieme $\text{Im } F = \{w \in W \mid \exists v \in V \quad F(v) = w\}$ è un sottospazio vettoriale di W .

Soluzione. a) Siano $x, y \in \text{Ker } F$; per definizione questo significa: $F(x) = 0$, $F(y) = 0$. Allora $F(x+y) = F(x) + F(y) = 0 + 0 = 0$ e quindi anche $x+y$ appartiene a $\text{Ker } F$; abbiamo così dimostrato che l'insieme $\text{Ker } F$ è chiuso rispetto alla somma. Se λ è un qualunque numero e $x \in \text{Ker } F$, allora $F(\lambda x) = \lambda F(x) = \lambda \cdot 0 = 0$, quindi $\lambda x \in \text{Ker } F$; l'insieme $\text{Ker } F$ è dunque chiuso rispetto alla moltiplicazione per uno scalare. Infine $\text{Ker } F$ non è vuoto, in quanto contiene il vettore 0 : infatti $F(0) = 0$. Questo completa la dimostrazione.

b) Siano $w_1, w_2 \in \text{Im } F$; per definizione questo significa che esistono $v_1, v_2 \in V$ tali che $w_1 = F(v_1)$ e $w_2 = F(v_2)$. Allora

$$w_1 + w_2 = F(v_1) + F(v_2) = F(v_1 + v_2)$$

e quindi anche $w_1 + w_2$ appartiene a $\text{Im } F$. Se λ è un qualunque numero, allora

$$\lambda w_1 = \lambda F(v_1) = F(\lambda v_1)$$

e quindi λw_1 appartiene a $\text{Im } F$. Inoltre $\text{Im } F$ contiene almeno il vettore nullo, perché $0 = F(0)$. Concludiamo che $\text{Im } F$ è un sottospazio di W .

Esercizio 1.14.5 Sia $L_A : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare $L_A(X) = AX$, dove A è la matrice

$$A = \begin{vmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 4 & 1 & 2 \\ 0 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

Trovare $\text{rk } L_A$, $\dim \text{Ker } L_A$ e una base di $\text{Im } L_A$.

Capitolo 2

Sistemi lineari. Rette e piani nello spazio

2.1 Sistemi lineari. Il teorema di Rouché-Capelli

Un *sistema lineare di m equazioni in n incognite x_1, \dots, x_n* è un sistema del tipo

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{m1}x_1 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases}$$

In forma matriciale si scrive come $AX = b$, dove

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{2n} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ a_{m1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{mn} \end{vmatrix}$$

La matrice A si chiama *matrice dei coefficienti*,

$$X = \begin{vmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{vmatrix}$$

è il *vettore colonna delle incognite* e

$$b = \begin{vmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_m \end{vmatrix}$$

è il *vettore colonna dei termini noti*.

Esempio. Il sistema lineare di due equazioni in tre incognite

$$\begin{cases} x_1 - 5x_2 + 3x_3 = 2 \\ 7x_1 + 3x_2 - x_3 = 1 \end{cases}$$

si scrive in forma matriciale come:

$$\begin{vmatrix} 1 & -5 & 3 \\ 7 & 3 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Il sistema $AX = b$ è detto *omogeneo* se $b = 0$. Una *soluzione* del sistema $AX = b$ è un qualunque vettore X_0 di \mathbb{R}^n (ossia una qualunque n -upla ordinata di numeri reali) tale che $AX_0 = b$. Denoteremo con

$$\text{Sol}(A, b) = \{X_0 \in \mathbb{R}^n \mid AX_0 = b\}$$

l'insieme delle soluzioni del sistema $AX = b$.

Il sistema $AX = b$ è detto *risolubile* se ha almeno una soluzione, cioè se $\text{Sol}(A, b) \neq \emptyset$.

Due sistemi $AX = b$ e $A'X = b'$ con lo stesso numero di incognite si dicono equivalenti se $\text{Sol}(A, b) = \text{Sol}(A', b')$, cioè se hanno esattamente le stesse soluzioni.

Consideriamo un sistema lineare $AX = b$ di m equazioni in n incognite:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases}$$

Il sistema può essere scritto anche:

$$x_1 \begin{vmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{vmatrix} + x_2 \begin{vmatrix} a_{12} \\ \vdots \\ a_{m2} \end{vmatrix} + \dots + x_n \begin{vmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{vmatrix}$$

o, in modo più conciso,

$$x_1 A^1 + \dots + x_n A^n = b,$$

dove A^1, \dots, A^n sono le colonne della matrice A dei coefficienti.

Vediamo allora che ogni (eventuale) soluzione (x_1, \dots, x_n) esprime il vettore b dei termini noti come combinazione lineare delle colonne di A e quindi il sistema lineare $AX = b$ è risolubile se e solo se il vettore dei termini noti appartiene allo spazio generato dalle colonne della matrice dei coefficienti. Questa condizione si verifica se e solo se lo spazio vettoriale generato dalle colonne A^1, \dots, A^n è uguale allo spazio vettoriale generato da A^1, \dots, A^n, b , cioè se e solo se $\text{rk } A = \text{rk } [A, b]$, dove $[A, b]$ è la matrice che si ottiene accostando alla matrice dei coefficienti A la colonna b dei termini noti. In definitiva abbiamo dimostrato il seguente:

Teorema 2.1.1 (Rouché-Capelli) *Un sistema lineare $AX = b$ è risolubile se e solo se il rango della matrice dei coefficienti è uguale al rango della matrice completa:*

$$AX = b \text{ risolubile} \iff \text{rk } A = \text{rk } [A, b]$$

2.2 Sottospazi affini

Definizione 2.2.1 Si dice che un sottoinsieme S di uno spazio vettoriale V è un sottospazio affine, o una varietà affine, di V se $S = \emptyset$ oppure esistono un sottospazio vettoriale W di V e un vettore $v_0 \in V$ per i quali

$$S = W + v_0 = \{v \in V \mid v = w + v_0 \text{ per qualche } w \in W\}$$

Si dice che W è il sottospazio vettoriale associato a S , e che S è parallelo a W . La dimensione $\dim S$ di S è, per definizione, la dimensione di W .

Ogni sottospazio affine (diverso dall'insieme vuoto) si ottiene dunque da un sottospazio vettoriale di V mediante un'opportuna *traslazione*. Naturalmente ogni sottospazio vettoriale è anche un sottospazio affine (basta traslare di $v_0 = 0$). I sottospazi affini di dimensione uno e due si dicono anche, rispettivamente, rette e piani.

Esempi fondamentali sono i sottospazi affini di \mathbb{R}^3 . Ricordiamo che i sottospazi vettoriali di \mathbb{R}^3 sono lo spazio nullo (o spazio zero) $0 = \{(0, 0, 0)\}$, cioè lo spazio che ha come unico elemento il vettore nullo¹, tutte le rette passanti per l'origine, tutti i piani passanti per l'origine e l'intero spazio \mathbb{R}^3 . Pertanto i sottospazi affini di \mathbb{R}^3 sono:

- l'insieme vuoto \emptyset ;
- tutti i punti;
- tutte le rette (passanti o meno per l'origine);
- tutti i piani (passanti o meno per l'origine);
- lo spazio stesso \mathbb{R}^3 .

Definizione 2.2.2 Due piani affini $P_1 = W_1 + v_1$ e $P_2 = W_2 + v_2$ di uno spazio vettoriale V si dicono paralleli se $W_1 = W_2$.

Due rette affini $R_1 = U_1 + v_1$ e $R_2 = U_2 + v_2$ di uno spazio vettoriale V si dicono parallele se $U_1 = U_2$.

Una retta $R_1 = U_1 + v_1$ e un piano $P_2 = W_2 + v_2$ si dicono paralleli se $U_1 \subset W_2$.

Due sottospazi affini non vuoti sono sghembi se non sono paralleli e la loro intersezione è l'insieme vuoto; si dicono incidenti se non sono paralleli e la loro intersezione non è l'insieme vuoto.

Teorema 2.2.3 Sia $AX = b$ un qualunque sistema lineare non omogeneo in n incognite. Supponiamo che esista almeno una soluzione X_0 (ossia un vettore $X_0 \in \mathbb{R}^n$ tale che $AX_0 = b$). Allora l'insieme $Sol(A, b)$ delle soluzioni è

$$Sol(A, b) = Sol(A, 0) + X_0$$

In altre parole, le soluzioni del sistema $AX = b$ sono esattamente del tipo $Y + X_0$ dove Y è una qualunque soluzione del sistema omogeneo associato $AX = 0$.

¹Non si confonda lo spazio nullo con l'insieme vuoto \emptyset , che non è un sottospazio vettoriale.

Dimostrazione. Sia $Y \in \text{Sol}(A, 0)$. Questo significa che $AY = 0$. Allora

$$A(Y + X_0) = AY + AX_0 = 0 + b = b,$$

così $\text{Sol}(A, 0) + X_0$ è contenuto nell'insieme $\text{Sol}(A, b)$. Viceversa, sia X una qualunque soluzione di $AX = b$. Allora

$$A(X - X_0) = AX - AX_0 = b - b = 0.$$

Quindi $X - X_0 \in \text{Sol}(A, 0)$. Posto allora $Y = X - X_0$, abbiamo $X = Y + X_0$ con $AY = 0$ e quindi $\text{Sol}(A, b)$ è contenuto nell'insieme $\text{Sol}(A, 0) + X_0$. Questo prova il teorema. ■

Ricordando la definizione di sottospazio affine, concludiamo che *l'insieme $\text{Sol}(A, b)$ delle soluzioni di un qualunque sistema lineare in n incognite è un sottospazio affine di \mathbb{R}^n* . Precisamente, $\text{Sol}(A, b)$ (se non è vuoto) si ottiene traslando il sottospazio vettoriale $\text{Sol}(A, 0)$ (spazio delle soluzioni del sistema omogeneo associato) di un qualunque vettore X_0 che sia soluzione di $AX = b$.

Teorema 2.2.4 *Sia $AX = b$ (A matrice $m \times n$) un sistema lineare risolubile. Allora la dimensione dello spazio delle soluzioni è*

$$\dim \text{Sol}(A, b) = \text{numero delle incognite} - \text{rango} \quad (2.2.1)$$

Dimostrazione. Per ipotesi $\text{Sol}(A, b)$ non è vuoto, quindi si ottiene traslando il sottospazio vettoriale $\text{Sol}(A, 0) = \text{Ker } A$. Per il teorema 1.13.5,

$$\begin{aligned} \dim \text{Sol}(A, b) = \dim \text{Sol}(A, 0) = \dim \text{Ker } A &= n - \text{rk } A \\ &= \text{numero delle incognite} - \text{rango} \end{aligned}$$

■

Esempio. Consideriamo il sistema lineare non omogeneo in tre incognite

$$\begin{cases} 2x + y + z = 1 \\ y - z = 0 \end{cases}$$

Una soluzione particolare del sistema è $(1/2, 0, 0)$. Il rango della matrice dei coefficienti

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

è 2. Quindi la dimensione dello spazio delle soluzioni del sistema omogeneo è 1 e si vede facilmente che una sua soluzione è $(-1, 1, 1)$. Allora l'insieme delle soluzioni del sistema non omogeneo è

$$\text{Sol}(A, b) = \{t(-1, 1, 1) + (1/2, 0, 0), t \in \mathbb{R}\}$$

Vediamo che l'insieme delle soluzioni è una retta affine di \mathbb{R}^3 .

Esempio. Consideriamo il sistema di una sola equazione in tre incognite:

$$x - 2y + z = 1$$

Una soluzione particolare è $(1, 0, 0)$. L'equazione omogenea associata è

$$x - 2y + z = 0$$

il cui spazio delle soluzioni ha dimensione due: una sua base è $(2, 1, 0), (1, 0, -1)$. Ne segue

$$\text{Sol}(A, b) = \{s(2, 1, 0) + t(1, 0, -1) + (1, 0, 0), s, t \in \mathbb{R}\}$$

Vediamo che l'insieme delle soluzioni $\text{Sol}(A, b)$ è un piano affine di \mathbb{R}^3 .

Esempio. Consideriamo l'equazione lineare non omogenea $x + y - z = 3$. Vogliamo interpretare geometricamente nello spazio \mathbb{R}^3 l'insieme

$$S = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x + y - z = 3\}$$

delle sue soluzioni. Diamo a y e a z valori arbitrari, diciamo $y = s, z = t$ ($s, t \in \mathbb{R}$). Ricaviamo $x = -s + t + 3$. L'insieme delle soluzioni si può scrivere allora come

$$\begin{aligned} S &= \{(-s + t + 3, s, t), s, t \in \mathbb{R}\} = \{s(-1, 1, 0) + t(1, 0, 1) + (3, 0, 0), s, t \in \mathbb{R}\} \\ &= L((-1, 1, 0), (1, 0, 1)) + (3, 0, 0) \end{aligned}$$

Vediamo allora che l'insieme delle soluzioni S si ottiene trasladando il piano $W_0 = L((-1, 1, 0), (1, 0, 1))$, passante per l'origine, del vettore $(3, 0, 0)$. Dunque W è un piano affine di \mathbb{R}^3 . Si noti che:

1) $W_0 = L((-1, 1, 0), (1, 0, 1))$ è lo spazio delle soluzioni dell'equazione omogenea $x + y - z = 0$ associata all'equazione $x + y - z - 3 = 0$.

2) Il vettore $(3, 0, 0)$ è una soluzione particolare dell'equazione $x + y - z - 3 = 0$ (Si ottiene dall'insieme W delle soluzioni per $s = t = 0$).

Proposizione 2.2.5 *Sia A una matrice $m \times n$ con $m < n$. Allora il sistema lineare omogeneo $AX = 0$ ha almeno una soluzione non banale (cioè una soluzione con almeno una componente diversa da zero).*

2.3 Il metodo di eliminazione di Gauss

Con il *metodo di eliminazione di Gauss* si trasforma un sistema lineare in un sistema equivalente, ma più semplice da risolvere. Le operazioni che si effettuano sulle equazioni di un sistema per semplificarlo sono:

1. Moltiplicare un'equazione per un numero diverso da zero.
2. Sommare l'equazione i -esima all'equazione j -esima ($i \neq j$);
3. Scambiare di posto due equazioni.

Queste operazioni si riflettono nelle seguenti operazioni elementari sulle righe della matrice completa $[A, b]$ del sistema:

1. Moltiplicare una riga per un numero $\lambda \neq 0$;
2. sommare la riga i -esima alla riga j -esima ($i \neq j$);
3. scambiare di posto due righe.

Supponiamo di dovere risolvere un sistema lineare di m equazioni in n incognite, diciamo $AX = b$, dove A è una matrice $m \times n$, X è la colonna delle n incognite e $b \in \mathbb{R}^m$ è il vettore dei termini noti. Formiamo la matrice completa $M = [A, b]$ (di tipo $m \times (n+1)$) e effettuiamo una successione di operazioni elementari sulle righe della matrice M , per semplificarla. Sia $M' = [A', b']$ la matrice alla quale si giunge alla fine di questa successione di operazioni. Si dimostra facilmente che *le soluzioni del sistema lineare $A'X = b'$ sono esattamente quelle del sistema $AX = b$* . [Esercizio].

2.3.1 Esempi

Vediamo degli esempi di risoluzione di sistemi lineari con il metodo di eliminazione di Gauss.

Esempi. Risolvere i tre seguenti sistemi lineari in tre incognite:

$$(A) \begin{cases} x_1 - 3x_2 - 5x_3 = 1 \\ x_1 + x_2 - 4x_3 = 5 \\ 2x_1 - 10x_2 - 11x_3 = 0 \end{cases} \quad (2.3.1)$$

$$(B) \begin{cases} x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 1 \\ 3x_1 + 3x_2 + 7x_3 = 3 \\ 3x_1 - 3x_2 + x_3 = 1 \end{cases} \quad (2.3.2)$$

$$(C) \begin{cases} x_1 - 3x_2 - 5x_3 = 0 \\ x_1 - 2x_2 - 4x_3 = 3 \\ 2x_1 - 7x_2 - 11x_3 = -3 \end{cases} \quad (2.3.3)$$

Soluzione.

1° Passo. Scrivere la matrice completa del sistema.

Le matrici complete dei sistemi (A), (B), (C) sono:

$$\text{Sistema (A): } \begin{vmatrix} 1 & -3 & -5 & 1 \\ 1 & 1 & -4 & 5 \\ 2 & -10 & -11 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\text{Sistema (B): } \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 1 \\ 3 & 3 & 7 & 3 \\ 3 & -3 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\text{Sistema (C): } \begin{vmatrix} 1 & -3 & -5 & 0 \\ 1 & -2 & -4 & 3 \\ 2 & -7 & -11 & -3 \end{vmatrix}$$

2° *Passo*. Con operazioni elementari sulle righe, riduciamo a scala la matrice completa. A questo punto si può dire se il sistema ha soluzioni oppure no. Precisamente, se l'ultima riga non nulla della matrice a scala ha solo l'ultimo termine diverso da zero, ossia è del tipo

$$\left| 0 \quad . \quad . \quad . \quad 0 \quad b \right|$$

con $b \neq 0$, allora il sistema non ha soluzioni, altrimenti ne ha. Se il sistema non ha soluzioni, abbiamo finito. Altrimenti si passerà al successivo 3° *Passo*.

La riduzione a scala per righe delle matrici complete dei sistemi porta ai seguenti risultati.

Sistema (A):

$$\left| \begin{array}{cccc} 1 & -3 & -5 & 1 \\ 1 & 1 & -4 & 5 \\ 2 & -10 & -11 & 0 \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc} 1 & -3 & -5 & 1 \\ 0 & 4 & 1 & 4 \\ 0 & -4 & -1 & -3 \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc} 1 & -3 & -5 & 1 \\ 0 & 4 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right|$$

Poiché l'ultima riga della matrice a scala è $\left| 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \right|$ il sistema (A) non ha soluzioni. Infatti il sistema associato alla matrice a scala è

$$\begin{cases} x_1 - 3x_2 - 5x_3 = 1 \\ 4x_2 + x_3 = 4 \\ 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 = 1 \end{cases} \quad (2.3.4)$$

ovviamente senza soluzioni (perché la terza equazione non ha alcuna soluzione). Dunque il sistema originario (A), equivalente al sistema 2.3.4, non ha soluzioni.

Sistema (B):

$$\begin{aligned} & \left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 1 \\ 3 & 3 & 7 & 3 \\ 3 & -3 & 1 & 1 \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 1 \\ 0 & -3 & -2 & 0 \\ 0 & -9 & -8 & -2 \end{array} \right| \simeq \\ & \simeq \left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 1 \\ 0 & -3 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & -2 \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right| \end{aligned}$$

L'ultima riga della matrice a scala non è del tipo $\left| 0 \quad 0 \quad 0 \quad b \right|$ con $b \neq 0$. Pertanto il sistema (B) è risolubile.

Sistema (C):

Riduciamo a scala per righe la matrice dei coefficienti:

$$\left| \begin{array}{cccc|cccc} 1 & -3 & -5 & 0 & 1 & -3 & -5 & 0 \\ 1 & -2 & -4 & 3 & 0 & 1 & 1 & 3 \\ 2 & -7 & -11 & -3 & 0 & -1 & -1 & -3 \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc|cccc} 1 & -3 & -5 & 0 & 1 & -3 & -5 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 3 & 0 & 1 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right|$$

(Alla seconda riga abbiamo sommato la prima moltiplicata per -1). Poiché non compare una riga del tipo $\left| \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & b \end{array} \right|$ con $b \neq 0$, possiamo concludere che il sistema (C) è risolubile.

Prima di descrivere il passo successivo, diamo una definizione. Consideriamo una qualunque matrice a scala

$$A = \left| \begin{array}{cccccccc} p_1 & * & . & . & . & . & . & * \\ & & p_2 & . & . & . & . & * \\ & & & . & . & . & & \\ & & & & & & p_r & . & * \end{array} \right|$$

dove i numeri p_1, \dots, p_r sono diversi da zero, al posto degli spazi vuoti ci sono tutti zeri e al posto degli asterischi ci può essere qualunque numero. I numeri non nulli p_1, \dots, p_r che compaiono più a sinistra su ogni riga non nulla, sono detti *pivots* della matrice a scala.

3° Passo. Supponiamo che il sistema abbia soluzioni. Distinguiamo le incognite x_1, \dots, x_n in due classi: le variabili che stanno sulle colonne dei pivots sono variabili *dipendenti*; le eventuali restanti $n - r$ incognite sono variabili *libere*. Alle variabili libere, se ce ne sono, si attribuiscono valori arbitrari. Nell'ultima equazione (non nulla) scriviamo la variabile dipendente in funzione dei termini noti e delle eventuali variabili libere. Poi risolviamo il sistema all'indietro, sostituendo nella penultima equazione e così via, fino ad arrivare alla prima equazione. Se non ci sono variabili libere, il sistema ha un'unica soluzione. Se invece ci sono variabili libere, il sistema ha infinite soluzioni.

Vediamo come effettuare in concreto questo terzo passo nel caso dei sistemi (B) e (C).

Sistema (B):

I pivots della matrice a scala

$$\left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right|$$

sono sulla prima, seconda e terza colonna: non ci sono dunque variabili libere. Il sistema associato alla matrice a scala, equivalente al sistema (B), è

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 1 \\ \quad \quad x_2 + 2/3x_3 = 0 \\ \quad \quad \quad \quad x_3 = 1 \end{cases}$$

Risolvendo all'indietro, troviamo che questo sistema, e quindi il sistema originario (B), ha l'unica soluzione $(-2/3, -2/3, 1)$.

Sistema (C):

I pivots della matrice a scala

$$\begin{vmatrix} 1 & -3 & -5 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 3 \end{vmatrix}$$

sono sulla prima e sulla seconda colonna: dunque le variabili dipendenti sono x_1 e x_2 . La restante variabile x_3 è libera. Poiché c'è una variabile libera, il sistema ha *infinite* soluzioni. Per risolvere il sistema, cioè per dare una descrizione parametrica dell'insieme delle soluzioni, un modo è il seguente. Scriviamo il sistema associato alla matrice a scala, ossia il sistema

$$\begin{cases} x_1 - 3x_2 - 5x_3 = 0 \\ x_2 + x_3 = 3 \end{cases}$$

Alla variabile libera x_3 diamo un valore arbitrario t :

$$x_3 = t.$$

Sostituendo nella seconda equazione, troviamo

$$x_2 = 3 - t,$$

e sostituendo ancora all'indietro nella prima equazione, troviamo infine

$$x_1 = 9 + 2t.$$

L'insieme delle soluzioni del sistema è dato in forma parametrica da

$$\begin{cases} x_1 = 9 + 2t \\ x_2 = 3 - t \\ x_3 = t \end{cases}$$

Un modo migliore per trovare le soluzioni consiste nel continuare la riduzione per righe all'indietro fino a ottenere una matrice *a scala per righe in forma ridotta* (*reduced row echelon form*), ossia una matrice con i pivots tutti uguali a 1, e i termini sopra i pivots tutti uguali a zero:

$$\begin{vmatrix} 1 & -3 & -5 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 3 \end{vmatrix} \simeq \begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 & 9 \\ 0 & 1 & 1 & 3 \end{vmatrix}$$

Il sistema corrispondente è

$$\begin{cases} x_1 - 2x_3 = 9 \\ x_2 + x_3 = 3 \end{cases}$$

Ora, attribuendo alla variabile libera x_3 un valore arbitrario t , ricaviamo subito:

$$\begin{cases} x_1 = 9 + 2t \\ x_2 = 3 - t \\ x_3 = t \end{cases}$$

2.4 Esercizi

Esercizio 2.4.1 Risolvere il sistema lineare in tre incognite:

$$\begin{cases} x_1 - 3x_2 - 5x_3 = 1 \\ x_1 + x_2 - 4x_3 = 5 \\ 2x_1 - 10x_2 - 11x_3 = 0 \end{cases} \quad (2.4.1)$$

Soluzione. La matrice completa del sistema è

$$\begin{vmatrix} 1 & -3 & -5 & 1 \\ 1 & 1 & -4 & 5 \\ 2 & -10 & -11 & 0 \end{vmatrix}$$

Riduciamo a scala per righe:

$$\begin{vmatrix} 1 & -3 & -5 & 1 \\ 1 & 1 & -4 & 5 \\ 2 & -10 & -11 & 0 \end{vmatrix} \simeq \begin{vmatrix} 1 & -3 & -5 & 1 \\ 0 & 4 & 1 & 4 \\ 0 & -4 & -1 & -2 \end{vmatrix} \simeq \begin{vmatrix} 1 & -3 & -5 & 1 \\ 0 & 4 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}$$

Il sistema associato all'ultima matrice scritta è

$$\begin{cases} x_1 - 3x_2 - 5x_3 = 1 \\ 4x_2 + x_3 = 4 \\ 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 = 1 \end{cases} \quad (2.4.2)$$

ovviamente senza soluzioni (perché la terza equazione non ha alcuna soluzione). Dunque il sistema originario 2.4.1, equivalente al sistema 2.4.2, non ha soluzioni.

Esercizio 2.4.2 Risolvere il seguente sistema lineare omogeneo di quattro equazioni in tre incognite:

$$\begin{cases} -x + y = 0 \\ x - 3y - z = 0 \\ x + 1/2z = 0 \\ 3x - 2y + 1/2z = 0 \end{cases}$$

Soluzione. Poiché il sistema è omogeneo, basta ridurre a scala, con operazioni elementari di riga, la matrice dei coefficienti:

$$A = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -3 & -1 \\ 1 & 0 & 1/2 \\ 3 & -2 & 1/2 \end{vmatrix} \simeq \begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & -1 \\ 0 & 1 & 1/2 \\ 0 & 1 & 1/2 \end{vmatrix} \simeq \begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Il sistema iniziale è equivalente al sistema:

$$\begin{cases} -x + y = 0 \\ y + 1/2z = 0 \end{cases}$$

Abbiamo z come variabile libera: $z = t$, $t \in \mathbb{R}$ arbitrario. Ricaviamo poi $y = -\frac{1}{2}t$ e $x = -\frac{1}{2}t$. Lo spazio $Sol(A, 0)$ delle soluzioni del sistema omogeneo assegnato può essere descritto nel modo seguente:

$$\begin{aligned} Sol(A, 0) &= \{(-1/2t, -1/2t, t), t \in \mathbb{R}\} \\ &= \{t(-1/2, -1/2, 1), t \in \mathbb{R}\} \end{aligned}$$

Si noti che lo spazio delle soluzioni ha dimensione 1; una sua base è il vettore $(-1/2, -1/2, 1)$.

Esercizio 2.4.3 Risolvere il seguente sistema lineare omogeneo in 4 incognite:

$$\begin{cases} -x_1 + x_2 - 2x_3 & = 0 \\ x_3 - x_4 & = 0 \end{cases}$$

Soluzione. La matrice dei coefficienti del sistema è:

$$A = \begin{vmatrix} -1 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

Il sistema è già ridotto a scala. Le variabili libere (quelle che non corrispondono alle colonne dei pivots) sono x_2 e x_4 : a queste variabili possiamo assegnare valori arbitrari, diciamo $x_2 = s$, $x_4 = t$, $s, t \in \mathbb{R}$. Risolvendo il sistema all'indietro, troviamo $x_3 = t$, $x_1 = s - 2t$. Quindi lo spazio delle soluzioni del sistema omogeneo $AX = 0$, detto anche *spazio nullo* o *nucleo* della matrice A , e denotato $\ker A$ (oppure $Sol(A, 0)$) è:

$$\begin{aligned} \ker A &= \{(s - 2t, s, t, t), s, t \in \mathbb{R}\} \\ &= \{s(1, 1, 0, 0) + t(-2, 0, 1, 1), s, t \in \mathbb{R}\}. \end{aligned}$$

Si noti che $\dim \ker A = 2$ (= numero delle incognite - rango). Una base di $\ker A$ è costituita dai due vettori $(1, 1, 0, 0)$, $(-2, 0, 1, 1)$.

Esercizio 2.4.4 Risolvere il sistema $AX = 0$, dove

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 3 \\ 0 & 2 & 5 \end{vmatrix}, \quad X = \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix}$$

e trovare una base dello spazio nullo $\ker A$ della matrice A .

Soluzione. Una riduzione a scala per righe della matrice A dei coefficienti del sistema è:

$$A' = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}$$

Abbiamo una sola variabile libera: la variabile x , che corrisponde all'unica colonna sulla quale non ci sono pivots. Diamo a x un valore arbitrario, $x = t$, $t \in \mathbb{R}$. Risolvendo il sistema omogeneo (in *tre* incognite)

$$\begin{cases} y + 3z = 0 \\ -z = 0 \end{cases}$$

associato alla matrice A' (equivalente al sistema assegnato), troviamo allora $x = t$, $y = 0$ e $z = 0$. In definitiva:

$$\begin{aligned} \ker A &= \{(t, 0, 0), t \in \mathbb{R}\} \\ &= \{t(1, 0, 0), t \in \mathbb{R}\}. \end{aligned}$$

Una base del sottospazio $\ker A$ è $(1, 0, 0)$.

Esercizio 2.4.5 Discutere il sistema:

$$\begin{cases} 2x + y - z = 2 \\ 3x + y + 2z = 1 \\ 5x + 2y + z = h \end{cases}$$

dove $h \in \mathbb{R}$.

Soluzione. Riduciamo a scala per righe la matrice completa del sistema:

$$\left| \begin{array}{cccc} 2 & 1 & -1 & 2 \\ 3 & 1 & 2 & 1 \\ 5 & 2 & 1 & h \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc} 2 & 1 & -1 & 2 \\ 0 & -\frac{1}{2} & \frac{7}{2} & -2 \\ 0 & -\frac{1}{2} & \frac{7}{2} & -5+h \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc} 2 & 1 & -1 & 2 \\ 0 & -\frac{1}{2} & \frac{7}{2} & -2 \\ 0 & 0 & 0 & -3+h \end{array} \right|$$

Se $-3+h \neq 0$, cioè se $h \neq 3$, il sistema non ha soluzioni, perché l'ultima equazione è

$$0 \cdot x + 0 \cdot y + 0 \cdot z = -3 + h.$$

Se $h = 3$, il sistema assegnato è equivalente al sistema la cui matrice completa è:

$$\left| \begin{array}{cccc} 2 & 1 & -1 & 2 \\ 0 & -\frac{1}{2} & \frac{7}{2} & -2 \end{array} \right|$$

Quest'ultima matrice è equivalente alla matrice a scala in forma ridotta

$$\left| \begin{array}{cccc} 1 & 0 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & -7 & 4 \end{array} \right|$$

alla quale è associato il sistema

$$\begin{cases} x & + & 3z & = & -1 \\ & y & - & 7z & = & 4 \end{cases}$$

La variabile z è libera: $z = t$, $t \in \mathbb{R}$. Risolvendo all'indietro, ricaviamo $y = 7t + 4$, $x = -3t - 1$. Le soluzioni sono date allora da:

$$\{(-3t - 1, 7t + 4, t), t \in \mathbb{R}\}$$

ossia da

$$\{t(-3, 7, 1) + (-1, 4, 0), t \in \mathbb{R}\}.$$

Esercizio 2.4.6 Trovare i numeri reali α per i quali il sistema

$$\begin{cases} x & +y & -\alpha z & = & 2 \\ x & +y & +2z & = & 1 \end{cases} \quad (2.4.3)$$

ha soluzioni.

Soluzione. Riduciamo a scala la matrice completa associata al sistema:

$$\left| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & -\alpha & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \end{array} \right| \simeq \left| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & -\alpha & 2 \\ 0 & 0 & 2+\alpha & -1 \end{array} \right|$$

Se $2+\alpha = 0$, il sistema non ha soluzioni (perché l'equazione che corrisponde alla seconda riga della matrice ridotta è $0 \cdot z = -1$). Se invece $2+\alpha \neq 0$, il sistema ammette soluzioni: la variabile y è libera, e risolvendo all'indietro ricaviamo $z = -1/(2+\alpha)$, $y = t$, $t \in \mathbb{R}$, $x = 2 - \alpha/(2+\alpha) - t$. Dunque, se $\alpha \neq -2$, le soluzioni sono:

$$t(-1, 1, 0) + (4 + \alpha/(2+\alpha), 0, -1/(2+\alpha)), t \in \mathbb{R}.$$

Esercizio 2.4.7 Consideriamo un sistema di n particelle sul piano \mathbb{R}^2 , di masse m_1, \dots, m_n e vettori di posizione $r_1, \dots, r_n \in \mathbb{R}^2$. Il vettore di posizione del centro di massa del sistema è

$$r_{cm} = \frac{1}{M}(m_1 r_1 + \dots + m_n r_n),$$

dove $M = m_1 + \dots + m_n$. Si consideri il triangolo di vertici

$$r_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \end{vmatrix}, \quad r_2 = \begin{vmatrix} 2 \\ 3 \end{vmatrix}, \quad r_3 = \begin{vmatrix} 4 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Dire se è possibile distribuire fra i tre vertici del triangolo la massa totale di un 1 kg, in modo tale che il centro di massa del sistema sia $r_{cm} = \begin{vmatrix} 2 \\ 2 \end{vmatrix}$. Quante soluzioni ci sono?

Soluzione. Siano m_1, m_2, m_3 le tre masse da determinare.. Le richieste sono:

$$m_1 + m_2 + m_3 = 1 \quad (2.4.4)$$

$$m_1 \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \end{vmatrix} + m_2 \begin{vmatrix} 2 \\ 3 \end{vmatrix} + m_3 \begin{vmatrix} 4 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 \\ 2 \end{vmatrix} \quad (2.4.5)$$

Inoltre, per il loro significato fisico, sono accettabili solo valori non negativi di m_1, m_2, m_3 :

$$m_1 \geq 0, \quad m_2 \geq 0, \quad m_3 \geq 0. \quad (2.4.6)$$

Risolvendo il sistema costituito dalle equazioni 2.4.4 e 2.4.5 otteniamo $m_1 = \frac{1}{2}, m_2 = \frac{1}{4}, m_3 = \frac{1}{4}$, che è una soluzione accettabile, in quanto soddisfa anche la condizione 2.4.6.

Esercizio 2.4.8 Dato nello spazio \mathbb{R}^3 un sistema di particelle di masse m_1, \dots, m_n e velocità v_1, \dots, v_n , definiamo il momento P del sistema come

$$P = m_1 v_1 + \dots + m_n v_n.$$

Supponiamo ora che due particelle con velocità

$$v_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix}, \quad v_2 = \begin{vmatrix} 4 \\ 7 \\ 10 \end{vmatrix}$$

collidano. Si osserva che, dopo la collisione, le loro rispettive velocità sono

$$v'_1 = \begin{vmatrix} 4 \\ 7 \\ 4 \end{vmatrix}, \quad v'_2 = \begin{vmatrix} 2 \\ 3 \\ 8 \end{vmatrix}$$

Assumendo il principio di conservazione del momento, trovare il rapporto tra la massa m_1 e la massa m_2 .

Soluzione. Per il principio di conservazione del momento abbiamo

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2,$$

ossia

$$m_1 \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix} + m_2 \begin{vmatrix} 4 \\ 7 \\ 10 \end{vmatrix} = m_1 \begin{vmatrix} 4 \\ 7 \\ 4 \end{vmatrix} + m_2 \begin{vmatrix} 2 \\ 3 \\ 8 \end{vmatrix}$$

Esplicitamente:

$$\begin{cases} m_1 + 4m_2 = 4m_1 + 2m_2 \\ m_1 + 7m_2 = 7m_1 + 3m_2 \\ m_1 + 10m_2 = 4m_1 + 8m_2 \end{cases}$$

da cui ricaviamo $\frac{m_1}{m_2} = \frac{2}{3}$.

Esercizio 2.4.9 Sia A una matrice quadrata $n \times n$ e sia b un qualunque vettore di \mathbb{R}^n . Dimostrare che se A è invertibile, allora il sistema lineare $AX = b$ ha esattamente una soluzione, precisamente $X = A^{-1}b$.

2.5 Rette e piani nello spazio

Cominciamo con il richiamare dei risultati già dimostrati, che saranno utilizzati in questa sezione:

Un sistema lineare $AX = b$ è risolubile se e solo se il rango della matrice dei coefficienti è uguale al rango della matrice completa:

$$AX = b \text{ risolubile} \iff \text{rk } A = \text{rk } [A, b]$$

In tal caso la dimensione $\dim \text{Sol}(A, b)$ dello spazio delle soluzioni è uguale al numero delle incognite meno il rango. (Si veda 2.1.1 e 2.2.1).

Equazione cartesiana di un piano. Un'equazione del tipo

$$ax + by + cz = d, \quad (2.5.1)$$

dove almeno uno dei coefficienti a, b, c è diverso da zero, rappresenta un piano (affine) nello spazio. Chiamiamo π il piano 2.5.1. Il piano

$$\pi' = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid ax + by + cz = 0\}$$

è parallelo a π e passa per l'origine. Poichè un vettore (x, y, z) appartiene a π' se e solo se $(a, b, c) \cdot (x, y, z) = ax + by + cz = 0$, il piano π' è il complemento ortogonale della retta generata dal vettore (a, b, c) . Abbiamo così una interpretazione geometrica dei coefficienti di x, y, z nell'equazione di un piano: *il vettore (a, b, c) è ortogonale al piano di equazione cartesiana $ax + by + cz = d$.*

Naturalmente ogni altra equazione del tipo

$$(\lambda a)x + (\lambda b)y + (\lambda c)z = (\lambda d),$$

per ogni $\lambda \neq 0$, rappresenta ancora lo stesso piano π .

Equazioni cartesiane di una retta. Equazioni cartesiane di una retta nello spazio sono:

$$\begin{cases} ax + by + cz = d \\ a'x + b'y + c'z = d' \end{cases} \quad (2.5.2)$$

a condizione che

$$\text{rk} \begin{vmatrix} a & b & c \\ a' & b' & c' \end{vmatrix} = 2$$

Le equazioni cartesiane 2.5.2 esprimono la retta come intersezione di due piani non paralleli.

Equazioni parametriche di un piano. Equazioni parametriche di un piano π sono:

$$\begin{cases} x = x_0 + ls + l't \\ y = y_0 + ms + m't \\ z = z_0 + ns + n't \end{cases} \quad \text{oppure} \quad X = X_0 + s \begin{vmatrix} l \\ m \\ n \end{vmatrix} + t \begin{vmatrix} l' \\ m' \\ n' \end{vmatrix} \quad (2.5.3)$$

dove

$$\text{rk} \begin{vmatrix} l & l' \\ m & m' \\ n & n' \end{vmatrix} = 2,$$

cioè $v_1 = (l, m, n)$, $v_2 = (l', m', n')$ sono due qualunque vettori linearmente indipendenti. I vettori v_1, v_2 costituiscono una base del piano passante per l'origine e parallelo a π e il punto $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ appartiene al piano π .

Un piano può essere rappresentato in forma parametrica in infiniti modi, in quanto è arbitraria la scelta di una base del piano parallelo a π e passante per l'origine e la scelta del punto P_0 .

Equazioni parametriche di una retta. Equazioni parametriche di una retta r nello spazio sono

$$\begin{cases} x = x_0 + lt \\ y = y_0 + mt \\ z = z_0 + nt \end{cases} \quad \text{oppure} \quad X = X_0 + t \begin{vmatrix} l \\ m \\ n \end{vmatrix} \quad (2.5.4)$$

dove $(l, m, n) \neq (0, 0, 0)$ è una base della retta parallela a r e passante per l'origine. Si dice che il vettore (l, m, n) è un *vettore di direzione* della retta r .

Piani paralleli. Due piani

$$\pi : ax + by + cz = d, \quad \pi' : a'x + b'y + c'z = d'$$

sono paralleli se e solo se i vettori (a, b, c) , (a', b', c') (ortogonali a π e π' , rispettivamente) appartengono alla stessa retta, cioè se e solo se esiste un numero λ per il quale

$$a' = \lambda a, \quad b' = \lambda b, \quad c' = \lambda c$$

Rette parallele. Due rette r e r' di equazioni parametriche

$$r : \begin{cases} x = x_0 + lt \\ y = y_0 + mt \\ z = z_0 + nt \end{cases} \quad r' : \begin{cases} x = x'_0 + l't \\ y = y'_0 + m't \\ z = z'_0 + n't \end{cases} \quad (2.5.5)$$

sono parallele se e solo se i loro vettori di direzione (a, b, c) e (a', b', c') sono proporzionali, cioè se esiste un numero λ per il quale

$$a' = \lambda a, \quad b' = \lambda b, \quad c' = \lambda c$$

Piani ortogonali. Due piani

$$\pi : ax + by + cz = d, \quad \pi' : a'x + b'y + c'z = d'$$

sono ortogonali se e solo se i vettori (a, b, c) , (a', b', c') sono ortogonali, cioè se e solo se

$$a a' + b b' + c c' = 0$$

Rette ortogonali. Due rette r e r' di equazioni parametriche

$$r : \begin{cases} x = x_0 + lt \\ y = y_0 + mt \\ z = z_0 + nt \end{cases} \quad r' : \begin{cases} x = x'_0 + l't \\ y = y'_0 + m't \\ z = z'_0 + n't \end{cases} \quad (2.5.6)$$

sono ortogonali se e solo se i loro vettori di direzione (l, m, n) e (l', m', n') sono ortogonali, cioè se e solo se

$$ll' + mm' + nn' = 0$$

Piano e retta ortogonali. Un piano

$$\pi : \quad ax + by + cz = d$$

e una retta

$$r : \begin{cases} x = x_0 + lt \\ y = y_0 + mt \\ z = z_0 + nt \end{cases} \quad (2.5.7)$$

sono ortogonali tra loro e se solo se il vettore (a, b, c) , ortogonale a π , e il vettore di direzione (l, m, n) della retta r sono multipli, cioè se e solo se esiste un numero ρ per il quale

$$a = \rho l, \quad b = \rho m, \quad c = \rho n$$

Piano e retta paralleli. Un piano

$$\pi : \quad ax + by + cz = d$$

e una retta

$$r : \begin{cases} x = x_0 + lt \\ y = y_0 + mt \\ z = z_0 + nt \end{cases} \quad (2.5.8)$$

sono paralleli tra loro e se solo se il vettore (a, b, c) , ortogonale a π , e il vettore di direzione (l, m, n) della retta r sono ortogonali:

$$al + bm + cn = 0$$

Fissata una retta r , l'insieme dei piani π dello spazio che contengono r (nel senso che $r \subset \pi$) si dice *fascio* di piani di *sostegno* la retta r .

Proposizione 2.5.1 *I piani del fascio il cui sostegno è la retta*

$$r : \begin{cases} ax + by + cz + d = 0 \\ a'x + b'y + c'z + d' = 0 \end{cases} \quad (2.5.9)$$

sono esattamente quelli la cui equazione è del tipo:

$$\lambda(ax + by + cz + d) + \mu(a'x + b'y + c'z + d') = 0 \quad (2.5.10)$$

dove λ e μ sono numeri non entrambi nulli.

Dimostrazione. 1) Dimostriamo che ogni piano di equazione cartesiana 2.5.10 appartiene al fascio il cui sostegno è la retta r . Sia $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ un punto qualunque della retta r . Questo significa:

$$ax_0 + by_0 + cz_0 + d = 0 \quad \text{e} \quad a'x_0 + b'y_0 + c'z_0 + d' = 0$$

Allora, per ogni λ, μ , anche

$$\lambda(ax_0 + by_0 + cz_0 + d) + \mu(a'x_0 + b'y_0 + c'z_0 + d') = 0$$

Quindi tutti i piani 2.5.10 contengono P_0 .

2) Viceversa, sia π un piano che contiene la retta r . Dimostriamo che π ha equazione del tipo 2.5.10. Sia $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$ un punto di π non appartenente a r .

Fra tutti i piani che hanno equazione del tipo 2.5.10, ce n'è sempre uno, diciamo π' , che passa per P_1 : basta scegliere i parametri λ e μ in modo che valga

$$\lambda(ax_1 + by_1 + cz_1 + d) + \mu(a'x_1 + b'y_1 + c'z_1 + d') = 0$$

Le soluzioni λ, μ dell'equazione di sopra sono infinite, ma tutte proporzionali tra loro, e quindi individuano uno stesso piano. I due piani π e π' contengono interamente sia la retta r che il punto P_1 , quindi coincidono. ■

2.6 Esercizi

Esercizio 2.6.1 Scrivere un'equazione parametrica per la retta passante per i punti $P = (2, 0, -1)$ e $Q = (1, -1, -3)$

Esercizio 2.6.2 Stabilire se i punti $P = (2, 0, 1)$, $Q = (1, 0, -3)$, $R = (2, 3, 1)$ sono allineati. Trovare un'equazione cartesiana per un piano passante per P, Q e R . Quanti piani siffatti esistono?

Esercizio 2.6.3 Scrivere equazioni parametriche per la retta r di equazioni cartesiane

$$\begin{cases} x - y + z - 1 = 0 \\ 2x - y - z + 3 = 0 \end{cases} .$$

Esercizio 2.6.4 Scrivere un'equazione cartesiana per il piano π di equazioni parametriche

$$\begin{cases} x = s - t + 2 \\ y = s + 2t \\ z = -s + t \end{cases}$$

Esercizio 2.6.5 Trovare equazioni parametriche per il piano di equazione cartesiana $x - 2y + z - 3 = 0$.

Esercizio 2.6.6 Sia r la retta di equazioni cartesiane $\begin{cases} x - y + z - 1 = 0 \\ 2x + y - z + 1 = 0 \end{cases} .$

1) Trovare un vettore di direzione di r ;

2) Scrivere un'equazione cartesiana del piano passante per l'origine e ortogonale a r .

Esercizio 2.6.7 Sia r la retta di equazioni cartesiane $r : \begin{cases} x - y + z - 1 = 0 \\ x + y - 2z + 2 = 0 \end{cases}$.

1) Trovare un vettore di direzione di r .

2) Scrivere equazioni parametriche per la retta s passante per $P = (1, 2, 5)$ e parallela alla retta r .

Esercizio 2.6.8 Scrivere un'equazione cartesiana per un piano passante (ammesso che ne esista uno) per l'origine e parallelo sia alla retta $r : \begin{cases} y + z - 1 = 0 \\ x + 2z + 1 = 0 \end{cases}$ che alla retta $s : \begin{cases} x + y = 0 \\ z + 1 = 0 \end{cases}$.

Esercizio 2.6.9 Scrivere un'equazione cartesiana per un piano passante per $P = (2, 3, 6)$ e ortogonale alla retta $r : \begin{cases} y + z = 0 \\ x - z + 1 = 0 \end{cases}$.

Esercizio 2.6.10 Scrivere un'equazione cartesiana per un piano passante per $P = (1, -2, 3)$ e contenente la retta $r : \begin{cases} 2x + y + z = 0 \\ 3x - y - z - 1 = 0 \end{cases}$.

Esercizio 2.6.11 Scrivere un'equazione cartesiana per un piano (ammesso che esista) contenente la retta $r : \begin{cases} 2x - y + z + 1 = 0 \\ x - y - 1 = 0 \end{cases}$ e parallelo al piano σ di equazione $2x - 3y + z - 1 = 0$. Quanti piani siffatti esistono?

Esercizio 2.6.12 Due rette r e s nello spazio si dicono sghembe se non sono parallele e $r \cap s = \emptyset$; si dicono incidenti se la loro intersezione è un punto. Stabilire se le rette r e s sono parallele, incidenti o sghembe:

$$r : \begin{cases} 2x - y + z + 1 = 0 \\ x - y - 1 = 0 \end{cases} \quad s : \begin{cases} x = 2t - 1 \\ y = -3t \\ z = 1 - t \end{cases}$$

Esercizio 2.6.13 Stabilire se le rette r e s sono parallele, incidenti o sghembe:

$$r : \begin{cases} x - y + z = 0 \\ 2x - y - z = 0 \end{cases} \quad s : \begin{cases} x = 1 - t \\ y = 2t \\ z = 3t \end{cases}$$

Esercizio 2.6.14 Trovare la distanza del piano π di equazione $x - 3y + 2z - 1 = 0$ dall'origine.

Esercizio 2.6.15 Nello spazio affine euclideo \mathbb{R}^3 sono assegnati la retta

$$r : \begin{cases} x = 2 - t \\ y = t - 1 \\ z = 2t \end{cases} \quad (2.6.1)$$

il piano π di equazione

$$\pi : x - 2y + z - 1 = 0 \quad (2.6.2)$$

e il punto $P = (5, 0, 1)$.

a) Dire se esiste una retta passante per il punto P , parallela al piano π , incidente la retta r e ad essa ortogonale. In caso affermativo, si scrivano equazioni parametriche per una qualunque di tali rette.

b) Stabilire per quali valori di $h \in \mathbb{R}$ la retta r è parallela al piano π' di equazione $2x - 2y + hz - 1 = 0$.

Esercizio 2.6.16 Nello spazio affine euclideo \mathbb{R}^3 sono assegnati il punto $P = (0, 3, 4)$ e i due piani π e π' di rispettive equazioni:

$$\pi : x - y - z - 1 = 0, \quad \pi' : 3x - y + z - 1 = 0.$$

a) Trovare equazioni parametriche per una qualunque retta (se ne esiste una) passante per P e parallela sia al piano π che al piano π' .

b) Trovare la distanza di P dal piano π' .

Esercizio 2.6.17 Si scrivano delle equazioni cartesiane per la retta r passante per i punti $P = (0, 6, 4)$ e $Q = (0, 1, 1)$. Trovare le coordinate di un qualunque punto di r distinto da P e Q .

Esercizio 2.6.18 Nello spazio affine euclideo, sia π il piano di equazione:

$$\pi : x - 3y - z - 1 = 0.$$

a) Scrivere un'equazione cartesiana di un qualunque piano passante per l'origine e ortogonale al piano π .

b) Scrivere equazioni cartesiane di una qualunque retta che sia contenuta nel piano π .

Esercizio 2.6.19 Nello spazio affine euclideo sono dati il piano π di equazione $x - y = 0$ e la retta

$$r : \begin{cases} x = 1 + kt \\ y = 2 \\ z = -2 + t \end{cases}$$

a) Dire per quali valori di $k \in \mathbb{R}$ il piano e la retta sono paralleli.

b) Dire per quali valori di $k \in \mathbb{R}$ il piano e la retta sono ortogonali.

Esercizio 2.6.20 Nello spazio affine \mathbb{R}^3 si considerino le rette

$$r : \begin{cases} x - y = 0 \\ z = 3 \end{cases} \quad s : \begin{cases} x = 1 + kt \\ y = 2 \\ z = t - 2 \end{cases}$$

Stabilire per quali valori di $k \in \mathbb{R}$ le rette sono sghembe, per quali sono parallele e per quali sono incidenti.

Esercizio 2.6.21 Nello spazio affine euclideo si considerino la retta

$$r : \begin{cases} x - 3y + z = 0 \\ 2x - z - 2 = 0 \end{cases}$$

e il piano π di equazione $y - 3z - 1 = 0$.

a) Scrivere un'equazione cartesiana di un qualunque piano contenente la retta r e ortogonale al piano π . Quanti piani siffatti esistono?

b) Scrivere equazioni parametriche del piano π .

Esercizio 2.6.22 Nello spazio affine euclideo sono dati il punto $Q = (3, 0, 1)$ e la retta r di equazioni parametriche:

$$r : \begin{cases} x = -3t \\ y = 3 \\ z = 3 + 3t \end{cases}$$

a) Trovare un'equazione cartesiana di un piano passante per il punto Q e contenente la retta r .

b) Trovare la distanza di Q dall'origine.

Esercizio 2.6.23 Nello spazio affine sono assegnate le rette

$$r : \begin{cases} 3x + 2y + 5z + 6 = 0 \\ x + 4y + 3z + 4 = 0 \end{cases} \quad s : \begin{cases} x = 1 - t \\ y = 3t \\ z = 0 \end{cases}$$

- a) Scrivere un'equazione parametrica per la retta parallela a r e passante per l'origine.
 b) Scrivere un'equazione per un piano (se esiste) passante per r e parallelo a s .

Esercizio 2.6.24 Sia r la retta di equazioni parametriche:

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 1 + t \\ z = 2 + 2t \end{cases}$$

- a) Scrivere un'equazione cartesiana di un piano che contiene la retta r e il punto $P = (0, 1, 0)$.
 b) Scrivere un'equazione parametrica di una qualunque retta passante per l'origine, incidente la retta r e ad essa ortogonale.

Esercizio 2.6.25 Siano

$$r : \begin{cases} 2x + 3y + 5z + 6 = 0 \\ 4x + y + 3z + 4 = 0 \end{cases} \quad r' : \begin{cases} y - 3 = x - 7 \\ x - 4 = z + 2 \end{cases}$$

due rette dello spazio affine \mathbb{R}^3 .

- a) Determinare parametri di direzione della retta r .
 b) Trovare le coordinate di un qualunque punto di r' .
 c) Scrivere un'equazione cartesiana di un piano passante per r e parallelo a r' .

Esercizio 2.6.26 Una retta r contiene il punto $P = (-1, 0, -1)$ ed è ortogonale al piano π di equazione $3x - 5y + z = 2$. Scrivere equazioni parametriche e cartesiane per r .

Esercizio 2.6.27 Nello spazio affine \mathbb{R}^3 sono assegnati il punto $P = (2, 0, 1)$ e la retta r di equazioni cartesiane

$$r : \begin{cases} 3x - y = 0 \\ x - z = 1 \end{cases}$$

- a) Trovare un'equazione cartesiana per un piano contenente sia P che r .
 b) Trovare un'equazione cartesiana per un piano contenente P e ortogonale alla retta r .

Esercizio 2.6.28 Nello spazio affine euclideo \mathbb{R}^3 , si considerino il piano π di equazione $x + y + z = 0$ e i punti $P = (1, 0, -1)$ e $Q = (1, 2, \alpha)$.

- a) Scrivere gli eventuali valori di $\alpha \in \mathbb{R}$ per i quali la retta PQ è parallela al piano π .
 b) Dire per quali eventuali valori di $\alpha \in \mathbb{R}$ la retta PQ è perpendicolare al piano π .

Capitolo 3

Spazi vettoriali euclidei

3.1 Spazi vettoriali euclidei

Definizione 3.1.1 Un prodotto interno su uno spazio vettoriale reale V è un'applicazione

$$\begin{aligned} \langle , \rangle : V \times V &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (v, w) &\longmapsto \langle v, w \rangle \end{aligned}$$

($\langle v, w \rangle$ si legge: “ v interno w ” o “ v scalare w ”), che soddisfa:

1. Bilinearità. Per ogni fissato $x \in V$, le applicazioni

$$\langle -, x \rangle : V \longrightarrow \mathbb{R}, \quad v \mapsto \langle v, x \rangle$$

e

$$\langle x, - \rangle : V \longrightarrow \mathbb{R}, \quad v \mapsto \langle x, v \rangle$$

sono lineari.

2. Simmetria. Per ogni v, w in V

$$\langle v, w \rangle = \langle w, v \rangle$$

3. Definita positività.

$$\langle v, v \rangle > 0 \quad \text{per tutti i vettori } v \neq 0.$$

Uno spazio vettoriale reale V insieme a un fissato prodotto interno g su V costituiscono uno spazio vettoriale euclideo (V, \langle , \rangle) .

Esempio. L'esempio fondamentale di spazio vettoriale euclideo è \mathbb{R}^n con il prodotto interno standard, o euclideo,

$$\langle , \rangle : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}$$

che ad ogni coppia $X = (x_1, \dots, x_n)$, $Y = (y_1, \dots, y_n)$ di vettori di \mathbb{R}^n associa il numero reale

$$\langle X, Y \rangle = x_1 y_1 + \dots + x_n y_n$$

Per denotare questo prodotto interno useremo anche il punto “ \cdot ” e scriveremo $X \cdot Y = x_1 y_1 + \dots + x_n y_n$.

La semplice verifica delle seguenti proprietà è lasciata come esercizio (X e Y sono arbitrari vettori di \mathbb{R}^n):

$$\begin{aligned} \text{Bilinearità:} \quad (X+Y) \cdot Z &= X \cdot Z + Y \cdot Z \\ (\lambda X) \cdot Y &= \lambda(X \cdot Y) \\ X \cdot (Y+Z) &= X \cdot Y + X \cdot Z \\ X \cdot (\lambda Y) &= \lambda(X \cdot Y) \end{aligned}$$

$$\text{Simmetria:} \quad X \cdot Y = Y \cdot X$$

$$\text{Definita positività:} \quad \forall X \neq 0 \quad X \cdot X > 0$$

Esempio. Lo spazio vettoriale $V = C[a, b]$ di tutte le funzioni continue con dominio l'intervallo $[a, b] \subset \mathbb{R}$ e codominio \mathbb{R} è uno spazio vettoriale euclideo (infinito-dimensionale) rispetto al prodotto interno definito da

$$\langle f, g \rangle = \int_a^b f(t)g(t) dt \quad (3.1.1)$$

per ogni coppia di funzioni $f, g \in V$.

Nel seguito di questa sezione, $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ designerà uno spazio vettoriale euclideo.

Definizione 3.1.2 La norma, o lunghezza, di un vettore v di V è il numero reale

$$\|v\| = \sqrt{\langle v, v \rangle}$$

Un vettore $v \in V$ si dice unitario se $\|v\| = 1$.

La distanza $d(v, w)$ fra due punti $v, w \in \mathbb{R}^n$ è il numero $d(v, w) = \|v - w\|$.

Per ogni $v, w \in V$, diciamo che v e w sono ortogonali se $\langle v, w \rangle = 0$.

Una base (v_1, \dots, v_n) di V si dice ortonormale se i vettori v_1, \dots, v_n sono tutti unitari e sono a due a due ortogonali tra loro, cioè se

$$\langle v_i, v_j \rangle = \begin{cases} 1 & \text{se } i = j, \\ 0 & \text{se } i \neq j. \end{cases}$$

Esempio. La norma del vettore $A = (1, 2, -1) \in \mathbb{R}^3$ è $\|A\| = \sqrt{1^2 + 2^2 + (-1)^2} = \sqrt{6}$.

Esempio. La base canonica di \mathbb{R}^3

$$e_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad e_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad e_3 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

è ortonormale.

Esempio. Per ogni numero reale ϑ , $((\cos \vartheta, \sin \vartheta), (-\sin \vartheta, \cos \vartheta))$ è una base ortonormale di \mathbb{R}^2 .

Definizione 3.1.3 Sia W un sottospazio vettoriale di V . Il complemento ortogonale W^\perp di W è il sottospazio vettoriale di V

$$W^\perp = \{v \in V \mid \langle v, w \rangle = 0 \text{ per ogni } w \in W\}$$

(Si vede facilmente che U^\perp è un sottospazio di V [Esercizio 3.2.6]).

Esempio. Sia W il sottospazio di \mathbb{R}^3 generato dal vettore non nullo (a, b, c) . Il complemento ortogonale di W è il piano (sottospazio vettoriale di dimensione due)

$$W^\perp = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid ax + by + cz = 0\}$$

Esempio. Consideriamo il sistema lineare omogeneo $AX = 0$, dove $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$, ossia il sistema $\begin{cases} x + 2y - z = 0 \\ 2x + 3y + z = 0 \end{cases}$. Le soluzioni (x, y, z) del sistema sono i vettori di \mathbb{R}^3 ortogonali alle righe $(1, 2, -1)$, $(2, 3, 1)$ della matrice A . Ne segue che lo spazio delle soluzioni $Sol(A, 0)$ è il complemento ortogonale del sottospazio vettoriale W (di dimensione due) di \mathbb{R}^3 generato dalle righe di A . Dunque $Sol(A, 0)$ è la retta (passante per l'origine) ortogonale al piano W .

L'esempio precedente si generalizza in modo ovvio e fornisce una interpretazione geometrica dei sistemi lineari omogenei:

Proposizione 3.1.4 Per ogni matrice A di tipo $m \times n$, lo spazio

$$Sol(A, 0) = \{X \in \mathbb{R}^n \mid AX = 0\}$$

delle soluzioni del sistema omogeneo $AX = 0$ è il complemento ortogonale del sottospazio di \mathbb{R}^n generato dalle righe di A .

3.2 Esercizi

Esercizio 3.2.1 Dimostrare che l'unico vettore di \mathbb{R}^n che è ortogonale a ogni vettore di \mathbb{R}^n è il vettore nullo.

Esercizio 3.2.2 Siano A, B vettori arbitrari di \mathbb{R}^n . Dimostrare che

$$\begin{aligned} (A + B) \cdot (A + B) &= \|A\|^2 + 2(A \cdot B) + \|B\|^2 \\ (A - B) \cdot (A + B) &= \|A\|^2 - 2(A \cdot B) + \|B\|^2 \end{aligned}$$

Dedurre che $\|A + B\| = \|A - B\|$ se e solo se $A \cdot B = 0$. Con l'aiuto di una figura, ci si convinca allora che la definizione "A, B sono ortogonali se $A \cdot B = 0$ " è ragionevole.

Esercizio 3.2.3 Dimostrare che la funzione norma $\|\cdot\| : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ soddisfa le seguenti proprietà:

1. Per ogni $A \in \mathbb{R}^n$, $\|A\| = 0 \iff A = 0$.
2. Per ogni $A \in \mathbb{R}^n$ e per ogni λ in \mathbb{R} , $\|\lambda A\| = |\lambda| \|A\|$.

Dimostrazione. 1. Poniamo $A = (a_1, \dots, a_n)$. Poiché $\|A\|^2 = a_1^2 + \dots + a_n^2$ è somma di quadrati di numeri reali, $\|A\| = 0$ se e solo se tutte le componenti a_i sono nulle.

2. La proprietà segue immediatamente dalla definizione di norma.

Esercizio 3.2.4 Stabilire se la seguente proposizione è vera o falsa: "Per tutti i vettori A, B, C di \mathbb{R}^n , $C \neq 0$, se $A \cdot C = B \cdot C$ allora $A = B$ ".

Esercizio 3.2.5 Dimostrare che se i vettori di \mathbb{R}^n v_1, \dots, v_k costituiscono un sistema ortonormale, nel senso che $v_i \cdot v_i = 1$ per ogni i e $v_i \cdot v_j = 0$ per ogni $i \neq j$, allora essi sono linearmente indipendenti. Dedurre che un sistema (ordinato e) ortonormale di n vettori di \mathbb{R}^n costituisce una base di \mathbb{R}^n .

Esercizio 3.2.6 Sia W un qualunque sottospazio vettoriale di uno spazio vettoriale euclideo V . Dimostrare che il complemento ortogonale W^\perp di W è un sottospazio vettoriale di V .

Esercizio 3.2.7 Sia W un sottospazio vettoriale di uno spazio vettoriale euclideo V . Dimostrare che $W^{\perp\perp} = W$.

3.3 Matrici ortogonali

Definizione 3.3.1 Una matrice quadrata A di ordine n si dice ortogonale se le sue colonne costituiscono una base ortonormale di \mathbb{R}^n (vale a dire, se le sue colonne hanno lunghezza 1 e sono a due a due ortogonali).

In modo equivalente, una matrice quadrata A di ordine n è ortogonale se ${}^t A A = I$ [Esercizio].

Esempio. La matrice $\begin{vmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{vmatrix}$ è ortogonale.

Esercizio. Dimostrare:

- 1) Se A è ortogonale, allora è invertibile e $A^{-1} = {}^t A$.
- 2) Il prodotto di due matrici ortogonali è ortogonale.

L'importanza delle matrici ortogonali deriva dalla caratterizzazione seguente.

Teorema 3.3.2 Per una matrice quadrata A le seguenti condizioni sono equivalenti:

- 1) A è ortogonale;
- 2) La moltiplicazione a sinistra per A preserva il prodotto scalare, cioè

$$(AX) \cdot (AY) = X \cdot Y \quad (3.3.1)$$

per ogni $X, Y \in \mathbb{R}^n$. ■

Rotazioni e riflessioni nel piano. Le matrici ortogonali 2×2 possono essere descritte in modo esplicito.

Proposizione 3.3.3 Una matrice quadrata 2×2 A è ortogonale, cioè soddisfa

$$(AX) \cdot (AY) = X \cdot Y \quad (3.3.2)$$

per ogni $X, Y \in \mathbb{R}^2$, se e solo se esiste un $\vartheta \in \mathbb{R}$ per il quale

$$A = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{vmatrix} \quad \text{oppure} \quad A = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ \sin \vartheta & -\cos \vartheta \end{vmatrix}$$

Dimostrazione. La prima colonna di A è l'immagine Ae_1 del vettore unitario $e_1 = (1, 0)$. Poiché A preserva le lunghezze, $\|Ae_1\| = 1$. Esiste allora un $\vartheta \in \mathbb{R}$ per il quale

$$Ae_1 = \begin{vmatrix} \cos \vartheta \\ \sin \vartheta \end{vmatrix}$$

La seconda colonna Ae_2 deve essere un vettore di lunghezza 1 ortogonale a Ae_1 . Le uniche due possibilità sono:

$$Ae_2 = \begin{vmatrix} -\sin \vartheta \\ \cos \vartheta \end{vmatrix} \quad \text{oppure} \quad Ae_2 = \begin{vmatrix} \sin \vartheta \\ -\cos \vartheta \end{vmatrix}$$

■

Interpretazione geometrica. Una matrice ortogonale del tipo

$$R_\vartheta = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{vmatrix}$$

è una *rotazione* di un angolo ϑ . Per le matrici di rotazione R_ϑ vale $\det R_\vartheta = 1$.

Una matrice ortogonale del tipo

$$S_\vartheta = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ \sin \vartheta & -\cos \vartheta \end{vmatrix}$$

può essere scritta

$$S_\vartheta = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ \sin \vartheta & -\cos \vartheta \end{vmatrix} = R_\vartheta \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} R_{-\vartheta}$$

e quindi si ottiene componendo, nell'ordine, le seguenti trasformazioni: una rotazione di $-\vartheta$, la simmetria rispetto all'asse $L(e_1)$, una rotazione di ϑ . Il risultato è la *simmetria* rispetto alla retta che forma con l'asse $L(e_1)$ un angolo di $\vartheta/2$. Si noti che $\det S_\vartheta = -1$.

3.4 Proiezioni ortogonali e matrici associate

3.4.1 Proiezioni ortogonali su rette

Proposizione 3.4.1 (Proiezione ortogonale lungo una retta) *Sia $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ uno spazio vettoriale euclideo e sia w un vettore non nullo di V . Allora ogni vettore v di V si decompone in modo unico come*

$$v = \lambda w + v' \tag{3.4.1}$$

dove λ è un numero reale e v' è un vettore ortogonale a w .

Dimostrazione. Se vale 3.4.1, con v' ortogonale a w , si deve avere necessariamente:

$$0 = \langle v', w \rangle = \langle v - \lambda w, w \rangle = \langle v, w \rangle - \lambda \langle w, w \rangle$$

e quindi

$$\lambda = \frac{\langle v, w \rangle}{\langle w, w \rangle}$$

e $v' = v - \frac{\langle v, w \rangle}{\langle w, w \rangle} w$. Questo prova l'unicità della scrittura 3.4.1. Per provare l'esistenza di una tale decomposizione, basta scrivere proprio

$$v = \frac{\langle v, w \rangle}{\langle w, w \rangle} w + v'$$

(dove $v' = v - \frac{\langle v, w \rangle}{\langle w, w \rangle} w$) e poi verificare, con un conto diretto, che $\langle v', w \rangle = 0$:

$$\langle v', w \rangle = \langle v - \frac{\langle v, w \rangle}{\langle w, w \rangle} w, w \rangle = \langle v, w \rangle - \frac{\langle v, w \rangle}{\langle w, w \rangle} \langle w, w \rangle = 0$$

■

Il teorema precedente permette di definire la proiezione ortogonale su una retta:

Definizione 3.4.2 Sia $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ uno spazio vettoriale euclideo e sia $W = L(w)$ la retta generata dal vettore (non nullo) $w \in V$. La proiezione ortogonale P_W (denotata anche P_w) sulla retta W è l'applicazione lineare

$$P_W : V \longrightarrow V, \quad v \longmapsto P_W(v)$$

dove $P_W(v)$ è l'unico vettore di V che soddisfa:

- a) $P_W(v) \in W$;
- b) $v - P_W(v) \in W^\perp$.

Se $W = L(w)$, dalla dimostrazione del teorema 3.4.1 abbiamo allora

$$P_W(v) = \frac{\langle v, w \rangle}{\langle w, w \rangle} w \tag{3.4.2}$$

Si noti che se il vettore \tilde{w} è unitario ($\langle \tilde{w}, \tilde{w} \rangle = 1$), la proiezione di v lungo la retta $W = L(\tilde{w})$ si scrive più semplicemente:

$$P_W(v) = \langle v, \tilde{w} \rangle \tilde{w} \quad (\tilde{w} \text{ unitario}) \tag{3.4.3}$$

Esempio. Cerchiamo la proiezione ortogonale di $v = (0, 0, 1)$ sulla retta generata dal vettore $w = (1, 0, 1)$. Abbiamo: $v \cdot w = 1$, $w \cdot w = 2$. Quindi:

$$P_w(v) = \frac{v \cdot w}{w \cdot w} w = \frac{1}{2}(1, 0, 1) = \left(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right)$$

3.4.2 Disuguaglianza di Cauchy-Schwarz. Angoli

Teorema 3.4.3 (“Teorema di Pitagora”) Siano x e y vettori di \mathbb{R}^n . Se x e y sono ortogonali, allora

$$\|x + y\|^2 = \|x\|^2 + \|y\|^2$$

Dimostrazione.

$$\begin{aligned}\|x + y\|^2 &= (x + y) \cdot (x + y) \\ &= x \cdot x + 2(x \cdot y) + y \cdot y \\ &= \|x\|^2 + 2(x \cdot y) + \|y\|^2 \\ &= \|x\|^2 + \|y\|^2 \quad \text{se } x \cdot y = 0\end{aligned} \quad \blacksquare$$

Il teorema seguente generalizza il fatto che in ogni triangolo rettangolo un cateto ha lunghezza minore o uguale a quella dell'ipotenusa:

Proposizione 3.4.4 *Siano W un sottospazio di \mathbb{R}^n , x un vettore di \mathbb{R}^n e indichiamo con $P_W(x)$ la proiezione ortogonale di x su W . Allora*

$$\|P_W(x)\| \leq \|x\| \quad (3.4.4)$$

Dimostrazione. Scriviamo $x = P_W(x) + (x - P_W(x))$. I due vettori $P_W(x)$ e $x - P_W(x)$ sono ortogonali (teorema 3.4.1). Per il teorema di Pitagora 3.4.3

$$\|x\|^2 = \|P_W(x)\|^2 + \|x - P_W(x)\|^2$$

Si deduce allora che $\|P_W(x)\| \leq \|x\|$. ■

Siano x e y vettori non nulli di \mathbb{R}^n . Proiettiamo x sulla retta $W = L(y)$:

$$P_W(x) = \frac{(x \cdot y)}{y \cdot y} y = \frac{(x \cdot y)}{\|y\|^2} y$$

Per la disuguaglianza 3.4.4:

$$\|x\| \geq \|P_W(x)\| = \left\| \frac{(x \cdot y)}{\|y\|^2} y \right\| = |x \cdot y| \left\| \frac{1}{\|y\|^2} y \right\| = |x \cdot y| \frac{1}{\|y\|}$$

Per giustificare questi passaggi, si noti che $\|kv\| = |k|\|v\|$ ($|k|$ = valore assoluto di k) per tutti i vettori v e tutti i numeri k . In definitiva:

$$\|x\| \geq |x \cdot y| \frac{1}{\|y\|}$$

equivalente a

$$|x \cdot y| \leq \|x\| \|y\|$$

Abbiamo allora dimostrato:

Teorema 3.4.5 (Disuguaglianza di Schwarz) *Per tutti i vettori x, y di \mathbb{R}^n vale la disuguaglianza*

$$|x \cdot y| \leq \|x\| \|y\| \quad (3.4.5)$$

Definizione 3.4.6 Siano $x, y \in \mathbb{R}^n$, entrambi diversi dal vettore nullo. Si definisce angolo $\alpha(x, y)$ formato da x e y il numero

$$\alpha(x, y) = \arccos \frac{x \cdot y}{\|x\| \|y\|}$$

(Per la disuguaglianza di Schwarz 3.4.5,

$$-1 \leq \frac{x \cdot y}{\|x\| \|y\|} \leq 1$$

Poiché la funzione $\cos : [0, \pi] \rightarrow [-1, 1]$ è invertibile e la sua inversa per definizione è \arccos , l'angolo α è ben definito).

Esempio. Trovare l'angolo tra i vettori $x = (1, 0, 0, 0)$ e $(1, 1, 1, 1)$.

Soluzione.

$$\alpha(x, y) = \arccos \frac{x \cdot y}{\|x\| \|y\|} = \arccos \frac{1}{1 \cdot 2} = \frac{\pi}{3}$$

Esercizio. Dimostrare che la funzione norma $\| \cdot \| : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ soddisfa la seguente proprietà:

$$\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\| \quad (\text{Disuguaglianza triangolare}) \quad (3.4.6)$$

Dimostrazione. Poiché i termini a primo e secondo membro della 3.4.6 sono non-negativi, la 3.4.6 equivale a

$$\|x + y\|^2 \leq (\|x\| + \|y\|)^2$$

che, facendo i conti, si scrive

$$\|x\|^2 + 2(x \cdot y) + \|y\|^2 \leq \|x\|^2 + 2\|x\| \|y\| + \|y\|^2$$

Quest'ultima disuguaglianza è vera per la disuguaglianza di Schwarz (si confrontino i termini di mezzo).

■

3.4.3 Matrici di proiezioni su rette

Se $V = \mathbb{R}^n$ e $w \in \mathbb{R}^n$ è un vettore unitario, allora (usando il punto “ \cdot ” per denotare il prodotto scalare euclideo di \mathbb{R}^n)

$$P_W(v) = (w \cdot v) w \quad (w \in \mathbb{R}^n \text{ unitario})$$

Scriviamo i vettori di \mathbb{R}^n come vettori colonna (matrici $n \times 1$). Allora si vede subito che

$$w \cdot v = {}^t w v$$

dove il secondo membro è il prodotto (di matrici) del vettore riga ${}^t w$ per il vettore colonna v . In termini di prodotto di matrici, il vettore $P_W(v)$ si scrive allora come

$$\begin{aligned} P_W(v) &= w(w \cdot v) \\ &= \underbrace{w}_{n \times 1} \underbrace{({}^t w v)}_{1 \times 1} \\ &= \underbrace{(w {}^t w)}_{n \times n} \underbrace{v}_{n \times 1} \end{aligned}$$

(Nell'ultimo passaggio si è usata la proprietà associativa del prodotto di matrici.) Vediamo allora che $(w^t w)$ è la matrice $n \times n$ per la quale si deve moltiplicare un qualunque vettore $v \in \mathbb{R}^n$ per ottenere la sua proiezione $P_W(v)$ sulla retta $W = L(w)$, cioè la matrice che rappresenta l'operatore $P_W : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ rispetto alla base canonica di \mathbb{R}^n . Abbiamo così dimostrato il

Teorema 3.4.7 *Sia W una retta di \mathbb{R}^n e sia w un vettore unitario di W . Sia A la matrice $n \times 1$ che ha come unica colonna il vettore w . Allora la matrice che rappresenta la proiezione ortogonale $P_W : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ rispetto alla base canonica di \mathbb{R}^n è $A ({}^t A)$.*

Esempio. Sia W la retta di \mathbb{R}^3 generata dal vettore $(1, 1, 1)$. Trovare la matrice che rappresenta la proiezione ortogonale P_W e trovare la proiezione su W del vettore $(1, 0, 2)$.

Soluzione. Un vettore unitario di W è $(1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$. Poniamo

$$A = \begin{vmatrix} 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \end{vmatrix}$$

La matrice che rappresenta il proiettore P_W è

$$A ({}^t A) = \begin{vmatrix} 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{vmatrix}$$

La proiezione ortogonale di $(1, 0, 2)$ sulla retta W è il vettore

$$P_W(v) = \begin{vmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix}$$

3.4.4 Il procedimento di Gram-Schmidt

Teorema 3.4.8 (Gram-Schmidt) *Data una qualunque base (v_1, \dots, v_n) di uno spazio vettoriale euclideo V , si può costruire un'altra base (v'_1, \dots, v'_n) di V con le proprietà seguenti:*

- (1) (v'_1, \dots, v'_n) è una base ortogonale, ossia $\langle v'_i, v'_j \rangle = 0$ se $i \neq j$;
- (2) per ogni $k = 1, \dots, n$, $L(v_1, \dots, v_k) = L(v'_1, \dots, v'_k)$.

Si ottiene poi una base ortonormale dividendo ogni vettore della base ortogonale (v'_1, \dots, v'_n) così costruita per la sua norma.

Dimostrazione. Poniamo

$$v'_1 = v_1$$

Per costruire v'_2 , sottraiamo da v_2 la sua proiezione su v'_1 , ossia poniamo

$$v'_2 = v_2 - \frac{\langle v_2, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} v'_1, \tag{3.4.7}$$

Allora:

1) v'_1 e v'_2 sono ortogonali. Infatti:

$$\langle v'_1, v'_2 \rangle = \langle v'_1, v_2 \rangle - \frac{\langle v_2, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} \langle v'_1, v'_1 \rangle = \langle v'_1, v_2 \rangle - \langle v_2, v'_1 \rangle = 0$$

2) $L(v'_1, v'_2) = L(v_1, v_2)$. Infatti da $v_1 = v'_1$ e da 3.4.7 segue che $v_2 \in L(v'_1, v'_2)$ e $v'_2 \in L(v_1, v_2)$. Di qui l'uguaglianza $L(v'_1, v'_2) = L(v_1, v_2)$.

Costruiamo ora v'_3 sottraendo da v_3 le sue proiezioni su v'_2 e v'_1 :

$$v'_3 = v_3 - \frac{\langle v_3, v'_2 \rangle}{\langle v'_2, v'_2 \rangle} v'_2 - \frac{\langle v_3, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} v'_1$$

Si dimostra come sopra che v'_3 è ortogonale a v'_1 e v'_2 . Inoltre dalla definizione di v'_3 e da $L(v'_1, v'_2) = L(v_1, v_2)$ segue $L(v_1, v_2, v_3) = L(v'_1, v'_2, v'_3)$. Si procede poi ricorsivamente in modo del tutto analogo, fino a considerare infine il vettore

$$v'_n = v_n - \frac{\langle v_n, v'_{n-1} \rangle}{\langle v'_{n-1}, v'_{n-1} \rangle} v'_{n-1} - \cdots - \frac{\langle v_n, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} v'_1.$$

■

Riassumendo, supponiamo che (v_1, \dots, v_n) sia una base qualunque di V . Per costruire una base *ortogonale* di V , si pone:

$$\begin{aligned} v'_1 &= v_1 \\ v'_2 &= v_2 - \frac{\langle v_2, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} v'_1, \\ v'_3 &= v_3 - \frac{\langle v_3, v'_2 \rangle}{\langle v'_2, v'_2 \rangle} v'_2 - \frac{\langle v_3, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} v'_1, \\ &\vdots \\ &\vdots \\ v'_n &= v_n - \frac{\langle v_n, v'_{n-1} \rangle}{\langle v'_{n-1}, v'_{n-1} \rangle} v'_{n-1} - \cdots - \frac{\langle v_n, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} v'_1. \end{aligned} \tag{3.4.8}$$

Allora la base (v'_1, \dots, v'_n) è ortogonale. Se poi si vuole una base *ortonormale*, basta dividere ogni vettore v'_i per la sua norma.

Esempio. Applichiamo il metodo di Gram-Schmidt per ortogonalizzare la base $v_1 = (2, -1, 2)$, $v_2 = (1, 1, 4)$, $v_3 = (2, 1, 3)$ di \mathbb{R}^3 . Otteniamo:

$$v'_1 = v_1 = (2, -1, 2)$$

$$\begin{aligned} v'_2 &= v_2 - \frac{\langle v_2, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} v'_1 = (1, 1, 4) - \frac{1 \cdot 2 + 1 \cdot (-1) + 4 \cdot 2}{2^2 + (-1)^2 + 2^2} (2, -1, 2) \\ &= (1, 1, 4) - (2, -1, 2) = (-1, 2, 2) \end{aligned} \tag{3.4.9}$$

$$\begin{aligned}
v'_3 &= v_3 - \frac{\langle v_3, v'_2 \rangle}{\langle v'_2, v'_2 \rangle} v'_2 - \frac{\langle v_3, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} v'_1 \\
&= (2, 1, 3) - \frac{2 \cdot 2 + 1 \cdot (-1) + 3 \cdot 2}{9} (2, -1, 2) - \frac{2 \cdot (-1) + 1 \cdot 2 + 3 \cdot 2}{(-1)^2 + 2^2 + 2^2} (-1, 2, 2) \\
&= (2, 1, 3) - (2, -1, 2) - \frac{2}{3} (-1, 2, 2) \\
&= \frac{1}{3} (2, 2, -1)
\end{aligned} \tag{3.4.10}$$

Esempio. Troviamo una base ortogonale (v'_1, v'_2) dello spazio vettoriale generato dai vettori di \mathbb{R}^4 $v_1 = (1, 1, 0, 1)$ e $v_2 = (1, -2, 0, 0)$. Poniamo $v'_1 = v_1$. Per costruire v'_2 sottraiamo da v_2 la sua proiezione ortogonale sul sottospazio generato da v'_1 :

$$v'_2 = v_2 - \frac{\langle v_2, v'_1 \rangle}{\langle v'_1, v'_1 \rangle} v'_1 = (1, -2, 0, 0) + \frac{1}{3} (1, 1, 0, 1) = (4/3, -5/3, 0, 1/3) \tag{3.4.11}$$

Se vogliamo una base ortonormale basta dividere i vettori v'_1, v'_2 per la loro norma. Si ottiene:

$$\frac{v'_1}{\|v'_1\|} = \frac{1}{\sqrt{3}} (1, 1, 0, 1) \quad \frac{v'_2}{\|v'_2\|} = \frac{1}{\sqrt{42}} (4, -5, 0, 1)$$

3.4.5 Proiezioni ortogonali

Utilizzando l'esistenza di basi ortonormali (assicurata dal procedimento di Gram-Schmidt) generalizziamo ora il teorema 3.4.1 definendo le proiezioni ortogonali su sottospazi arbitrari di uno spazio vettoriale euclideo $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$. Il teorema chiave è il seguente:

Teorema 3.4.9 *Sia $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ uno spazio vettoriale euclideo e sia W un suo sottospazio. Allora*

$$V = W \oplus W^\perp$$

Ricordiamo che $V = W \oplus W^\perp$ significa che ogni vettore v di V si scrive in modo unico come somma

$$v = v_{\parallel} + v_{\perp}$$

con v_{\parallel} in W e v_{\perp} in W^\perp .

Dimostrazione. Sia (w_1, \dots, w_k) una qualunque base ortonormale di W . Per ogni v in V poniamo

$$v_{\parallel} = P_W(v) = \langle v, w_1 \rangle w_1 + \dots + \langle v, w_k \rangle w_k \tag{3.4.12}$$

Ovviamente $v_{\parallel} \in W$. Inoltre $v - v_{\parallel}$ è ortogonale a ciascuno dei vettori w_1, \dots, w_k [Esercizio] e pertanto è ortogonale a W , cioè appartiene a W^\perp . Abbiamo allora provato che ogni $v \in V$ si scrive come $v = v_{\parallel} + v_{\perp}$, con v_{\parallel} in W e $v_{\perp} = v - v_{\parallel}$ in W^\perp . Supponiamo ora che v si possa scrivere in due modi

$$v = v_1 + v_2 \quad v = v'_1 + v'_2$$

con $v_1, v'_1 \in W$ e $v_2, v'_2 \in W^\perp$. Uguagliando le scritture si ricava

$$v_1 - v'_1 = v'_2 - v_2$$

dove $v_1 - v'_1 \in W$ e $v'_2 - v_2 \in W^\perp$. Il vettore $v_1 - v'_1$ appartiene così a W e anche a W^\perp (perché è uguale a $v'_2 - v_2 \in W^\perp$). Ne segue $v_1 - v'_1 \in W \cap W^\perp$. Ora l'unico vettore che sta

nell'intersezione $W \cap W^\perp$ è il vettore nullo [Esercizio] e quindi $v_1 - v'_1 = 0$, cioè $v_1 = v'_1$. Se ne deduce $v_2 = v'_2$ e quindi la scrittura di v come somma di una componente lungo W e una lungo W^\perp è unica. ■

Il teorema 3.4.9 permette di definire la proiezione ortogonale su un sottospazio, come segue.

Definizione 3.4.10 Sia $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ uno spazio vettoriale euclideo e sia W un suo sottospazio. La proiezione ortogonale P_W sul sottospazio W è l'applicazione lineare

$$P_W : V \longrightarrow V, \quad v \longmapsto P_W(v)$$

dove $P_W(v)$ è l'unico vettore di W che soddisfa:

- a) $P_W(v) \in W$;
- b) $v - P_W(v) \in W^\perp$.

Dalla dimostrazione del precedente teorema 3.4.9 segue che, se (w_1, \dots, w_k) è una base ortonormale del sottospazio W , la proiezione su W di un qualunque vettore $v \in V$ è data da

$$P_W(v) = \langle v, w_1 \rangle w_1 + \dots + \langle v, w_k \rangle w_k \quad (3.4.13)$$

Da 3.4.13 e da 3.4.3 segue

$$P_W(v) = P_{W_1}(v) + \dots + P_{W_k}(v) \quad (3.4.14)$$

dove P_{W_1}, \dots, P_{W_k} sono le proiezioni ortogonali sulle rette $W_i = L(w_i)$, $i = 1, \dots, k$:

La proiezione ortogonale di un vettore su un sottospazio W è uguale alla somma delle proiezioni ortogonali di v sulle rette generate dai vettori di una qualunque base ortonormale di W .

Esempio. Determinare la proiezione ortogonale del vettore $v = (1, -1, 0)$ sul sottospazio $W \subset \mathbb{R}^3$ generato dai vettori $a_1 = (1, -2, 1)$, $a_2 = (2, -2, 0)$.

Soluzione. A partire dai due vettori a_1, a_2 costruiamo una base ortonormale di W con il procedimento di Gram-Schmidt. Poniamo:

$$a'_1 = a_1 / \|a_1\| = \frac{1}{\sqrt{6}}(1, -2, 1)$$

$$a'_2 = a_2 - (a_2 \cdot a'_1)a'_1 = (2, -2, 0) - (1, -2, 1) = (1, 0, -1)$$

Una base ortonormale di W è

$$w_1 = \frac{1}{\sqrt{6}}(1, -2, 1), \quad w_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 0, -1)$$

La proiezione ortogonale di v su W è

$$\begin{aligned} P_W(v) &= \langle v, w_1 \rangle w_1 + \langle v, w_2 \rangle w_2 \\ &= ((1, -1, 0) \cdot \frac{1}{\sqrt{6}}(1, -2, 1)) \frac{1}{\sqrt{6}}(1, -2, 1) + ((1, -1, 0) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 0, -1)) \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 0, -1) \\ &= (1, -1, 0) \end{aligned}$$

Vediamo dunque che $(1, -1, 0)$ appartiene al sottospazio W .

3.4.6 Matrici di proiezioni

Sia W un sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^n e sia (w_1, \dots, w_k) una base ortonormale di W e siano $W_i = L(w_i)$, $i = 1, \dots, k$, le rette generate dai vettori w_i . Dall'uguaglianza 3.4.14 segue che (fissata comunque una base di \mathbb{R}^n) la matrice che rappresenta la proiezione ortogonale P_W è la somma delle matrici che rappresentano (rispetto alla stessa base) le singole proiezioni P_{W_i} , $i = 1, \dots, k$. Per semplificare le notazioni, supponiamo $k = 2$. Poniamo $w_1 = (x_1, \dots, x_n)$, $w_2 = (y_1, \dots, y_n)$. Dal teorema 3.4.7 segue che la matrice che rappresenta $P_W = P_{W_1} + P_{W_2}$ è

$$\begin{vmatrix} x_1 & & & \\ & \cdot & & \\ & & \cdot & \\ & & & x_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} y_1 & & & \\ & \cdot & & \\ & & \cdot & \\ & & & y_n \end{vmatrix}$$

La matrice scritta sopra è uguale a

$$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & & \\ & \cdot & \cdot & \\ & \cdot & \cdot & \\ x_n & y_n & & \end{vmatrix}$$

(Il termine di posto i, j per entrambe le matrici è $x_i x_j + y_i y_j$.) Concludiamo dunque con il seguente teorema, che generalizza 3.4.7.

Teorema 3.4.11 *Sia W un sottospazio di \mathbb{R}^n e sia (w_1, \dots, w_k) una base ortonormale di W . Sia A la matrice $n \times k$ che ha come colonne ordinatamente i vettori w_i , $i = 1, \dots, k$. Allora la matrice che rappresenta la proiezione ortogonale $P_W : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ rispetto alla base canonica di \mathbb{R}^n è $A ({}^t A)$.*

Esempio. Scrivere la matrice della proiezione ortogonale $P_W : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ sul sottospazio $W \subset \mathbb{R}^3$ generato dai vettori $a_1 = (1, -2, 1)$, $a_2 = (2, -2, 0)$.

Soluzione. Abbiamo visto nell'esempio precedente che una base ortonormale di W è

$$w_1 = \frac{1}{\sqrt{6}}(1, -2, 1), \quad w_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 0, -1)$$

Dunque la matrice (rispetto alla base canonica) di P_W è

$$\begin{vmatrix} 1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} \\ -2/\sqrt{6} & 0 \\ 1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1/\sqrt{6} & -2/\sqrt{6} & 1/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{2} & 0 & -1/\sqrt{2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{vmatrix}$$

Capitolo 4

I determinanti

Introduciamo il determinante di una matrice quadrata facendo ricorso alle proprietà intuitive del volume.

In geometria elementare area e volume (in seguito diremo semplicemente volume) sono di solito presentati in termini di nozioni metriche quali lunghezze, angoli, perpendicolarità. In realtà il volume può essere caratterizzato in modo del tutto indipendente da queste nozioni, eccetto che per una costante moltiplicativa arbitraria che fisseremo per stabilire che il cubo unitario ha volume 1.

Il determinante - al contrario di lunghezze, aree e volumi in geometria elementare - può assumere anche valori negativi: anche di questo daremo un'interpretazione, in termini di orientamento dello spazio.

Introdurremo infine il determinante di un operatore $T : V \rightarrow V$ come il numero che esprime il fattore di scala con cui cambiano i volumi sotto l'effetto della trasformazione T .

4.1 Proprietà caratteristiche del determinante.

Mettiamo in evidenza alcune proprietà che una funzione

$$\det : M(n \times n, \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}, \quad A \mapsto \det A,$$

deve soddisfare perché il valore $\det A$ si possa interpretare (ad esempio per $n=3$) come volume del parallelepipedo che ha come spigoli le colonne di A . Constateremo che le proprietà enunciate sono sufficienti a caratterizzare la funzione \det in modo completo¹. Nel seguito scriveremo una matrice quadrata come

$$A = [v_1, \dots, v_n]$$

dove $v_1, \dots, v_n \in \mathbb{R}^n$ sono le colonne di A .

1) *Omogeneità*. Per ogni numero $\lambda \in \mathbb{R}$

$$\det[\lambda v_1, \dots, v_n] = \lambda \det[v_1, \dots, v_n]$$

Lo stesso vale per ogni altra colonna.

¹Seguiamo: G. Prodi, *Metodi Matematici e Statistici*, McGraw-Hill, Milano, 1992

Questa proprietà generalizza il fatto che il volume di un parallelepipedo è proporzionale alle lunghezze di ciascuno dei suoi lati. Si noti che, potendo essere λ di segno arbitrario, la funzione \det assume anche valori negativi. Dalla proprietà di omogeneità si deduce che se uno dei vettori colonna è nullo, anche il determinante è nullo:

$$\det[0, v_2, \dots, v_n] = \det[0 \cdot 0, v_2, \dots, v_n] = 0 \det[0, v_2, \dots, v_n] = 0$$

2) *Invarianza per scorrimento.* Sommando a una colonna un'altra diversa colonna moltiplicata per un qualunque numero, il valore del determinante non cambia:

$$\det[v_1 + \lambda v_2, v_2, \dots, v_n] = \det[v_1, v_2, \dots, v_n] \quad (i = 2, 3, \dots, n)$$

(Si disegni una figura: nel piano si ottengono parallelogrammi che hanno la stessa base e la stessa altezza). In particolare, se due colonne sono uguali, il valore del determinante è zero: se, ad esempio, $v_1 = v_2$

$$\det[v_1, v_2, \dots, v_n] = \det[v_1 - v_2, v_2, \dots, v_n] = \det[0, v_2, \dots, v_n] = 0$$

Dalla proprietà di invarianza per scorrimento, iterando il procedimento, si vede che *il valore del determinante non cambia se si somma a una colonna una qualsiasi combinazione lineare delle restanti colonne.*

3) *Normalizzazione.* Il determinante della matrice identità è 1:

$$\det I = \det[e_1, \dots, e_n] = 1$$

Con la condizione $\det I = 1$ veniamo a fissare una unità di misura per i volumi, richiedendo che il cubo unitario abbia volume 1.

Dalle proprietà che abbiamo enunciato, se ne deducono altre due importanti.

4) *Multilinearità.* La funzione \det è lineare in ciascuno dei suoi argomenti.

Questo significa che la funzione \det , oltre a essere omogenea rispetto a ogni argomento, è anche additiva. Ad esempio:

$$\det[v'_1 + v''_1, v_2, \dots, v_n] = \det[v_1, v_2, \dots, v_n] + \det[v'_1, v_2, \dots, v_n] \quad (4.1.1)$$

Dimostrazione. Se i vettori v_2, v_3, \dots, v_n sono linearmente dipendenti, tutti i determinanti che compaiono in 4.1.1 sono nulli e quindi l'uguaglianza vale. Supponiamo allora che v_2, v_3, \dots, v_n siano linearmente indipendenti e sia z un vettore di \mathbb{R}^n tale che $(z, v_2, v_3, \dots, v_n)$ sia una base di \mathbb{R}^n . Si potrà allora scrivere

$$v'_1 = \lambda'_1 z + \lambda'_2 v_2 + \lambda'_3 v_3 + \dots + \lambda'_n v_n \quad v''_1 = \lambda''_1 z + \lambda''_2 v_2 + \lambda''_3 v_3 + \dots + \lambda''_n v_n$$

Si noti che

$$v'_1 = \lambda'_1 z + \text{combinazione lineare di } v_2, v_3, \dots, v_n \quad v''_1 = \lambda''_1 z + \text{combinazione lineare di } v_2, v_3, \dots, v_n$$

Per le proprietà 2) e 1) si ha allora

$$\det[v'_1, v_2, \dots, v_n] = \det[\lambda'_1 z, v_2, \dots, v_n] = \lambda'_1 \det[z, v_2, \dots, v_n]$$

Analogamente

$$\det[v_1'', v_2, \dots, v_n] = \det[\lambda_1'' z, v_2, \dots, v_n] = \lambda_1'' \det[z, v_2, \dots, v_n]$$

e

$$\det[v_1' + v_1'', v_2, \dots, v_n] = \det[\lambda_1' z + \lambda_1'' z, v_2, \dots, v_n] = (\lambda_1' + \lambda_1'') \det[z, v_2, \dots, v_n]$$

Sostituendo le espressioni calcolate nell'uguaglianza 4.1.1, si vede allora che essa vale.

5) *Alternanza*. Se la matrice A' si ottiene dalla matrice A scambiando di posto due colonne, allora $\det A' = -\det A$. Ad esempio

$$\det[v_2, v_1, \dots, v_n] = -\det[v_1, v_2, \dots, v_n]$$

Dimostrazione. Ricordando che il determinante vale zero quando due colonne sono uguali, risulta:

$$\begin{aligned} 0 &= \det[v_1 + v_2, v_1 + v_2, \dots, v_n] \\ &= \det[v_1, v_1, \dots, v_n] + \det[v_1, v_2, \dots, v_n] + \det[v_2, v_1, \dots, v_n] + \det[v_2, v_2, \dots, v_n] \\ &= \det[v_1, v_2, \dots, v_n] + \det[v_2, v_1, \dots, v_n] \end{aligned}$$

Di qui la tesi. ■

Si noti che la proprietà di multilinearità implica ovviamente sia l'omogeneità (proprietà 1) che l'invarianza per scorrimento (proprietà 2). Quindi, in definitiva, richiediamo che la funzione \det sia *multilineare alternante e assuma il valore 1 sulla matrice identità*.

Non sappiamo ancora se una funzione con le proprietà richieste esista o meno; e, ammesso che ne esista una, non sappiamo se ce ne sia una sola. Dimostreremo nella prossima sezione che di funzioni $M(n \times n, \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ multilineari alternanti con valore 1 sulla matrice identità ne esiste *esattamente una*.

Per il momento diamo invece per scontato che la funzione determinante esista e utilizziamola allo scopo di stabilire se n vettori di \mathbb{R}^n sono o meno linearmente indipendenti. È evidente che due vettori nel piano \mathbb{R}^2 sono linearmente indipendenti se e solo se l'area del parallelogramma da essi generato è diversa da zero: quest'ultima condizione infatti equivale a dire che i due vettori non stanno su una stessa retta. In modo analogo, tre vettori di \mathbb{R}^3 sono linearmente indipendenti se e solo se il volume del parallelepipedo da essi generato non è nullo. Ricordando il significato geometrico del determinante come area o volume orientato, queste considerazioni rendono ragionevole la seguente generalizzazione: n vettori v_1, \dots, v_n di \mathbb{R}^n sono linearmente indipendenti se e solo se $\det[v_1, \dots, v_n] \neq 0$. In modo equivalente:

Teorema 4.1.1 *Siano v_1, \dots, v_n vettori arbitrari di \mathbb{R}^n . Allora v_1, \dots, v_n sono linearmente dipendenti se e solo se $\det(v_1, \dots, v_n) = 0$.*

Dimostrazione. Supponiamo che i vettori v_1, \dots, v_n siano linearmente dipendenti. Allora tra di essi ce n'è uno, diciamo v_1 , che è combinazione lineare degli altri:

$$v_1 = \lambda_2 v_2 + \dots + \lambda_n v_n.$$

Allora abbiamo

$$\begin{aligned}\det(v_1, \dots, v_n) &= \det(\lambda_2 v_2 + \dots + \lambda_n v_n, v_2, \dots, v_n) \\ &= \lambda_2 \det(v_2, v_2, \dots, v_n) + \dots + \lambda_n \det(v_n, v_2, \dots, v_n) \\ &= 0.\end{aligned}$$

(I determinanti sono tutti nulli perché in ciascuno di essi ci sono due colonne uguali).

Viceversa, supponiamo $\det(v_1, \dots, v_n) = 0$. Se i vettori v_1, \dots, v_n fossero linearmente indipendenti, essi costituirebbero una base di \mathbb{R}^n ; in particolare i vettori e_1, \dots, e_n della base canonica di \mathbb{R}^n si scriverebbero come combinazione lineare

$$e_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} v_i$$

($j = 1, \dots, n$). Sostituendo queste uguaglianze in $\det(e_1, \dots, e_n)$, e sviluppando per linearità, otteniamo una somma di determinanti tutti nulli o perché due colonne sono uguali, o perché coincidono (a meno del segno) con $\det(v_1, \dots, v_n)$, che è nullo per ipotesi. In definitiva, otterremmo $\det(e_1, \dots, e_n) = 0$. Ma questo è assurdo: infatti $\det(e_1, \dots, e_n) = 1$, per la proprietà di normalizzazione. I vettori v_1, \dots, v_n sono dunque linearmente dipendenti. ■

Proposizione 4.1.2 *Sia A una matrice $n \times n$. Sono equivalenti le proprietà :*

- 1) $\text{rk } A = n$.
- 2) $\det A \neq 0$.
- 3) A è invertibile.

Dimostrazione. Sappiamo già che A è invertibile se e solo se $\text{rk } A = n$ (1.13.7). Per il teorema precedente, le colonne della matrice A sono linearmente indipendenti, cioè $\text{rk } A = n$, se e solo se $\det A \neq 0$. ■

4.1.1 Esistenza e unicità del determinante.

Teorema 4.1.3 (Esistenza e unicità del determinante) *Per ogni intero positivo n esiste un'unica funzione*

$$\det : M(n \times n, \mathbb{R}) \longrightarrow \mathbb{R}, \quad A \longmapsto \det A,$$

multilineare alternante tale che $\det I_n = 1$.

Dimostrazione. Unicità. Dimostriamo quanto segue: ammesso che una funzione con le proprietà di multilinearità e alternanza richieste al determinante esista, allora essa deve necessariamente associare a ogni matrice quadrata di ordine n una ben determinata espressione, data dalla 4.1.2 scritta di sotto. Questo non proverà ancora che la funzione determinante esiste, ma ne proverà soltanto l'unicità, in questo senso: o la funzione non esiste affatto, oppure, se esiste, essa non può che essere data da 4.1.2. Cominciamo a dimostrare l'unicità della funzione \det per le matrici 2×2 . Questo darà un'idea di

come si procede nel caso generale. Più precisamente, dimostriamo che le proprietà di multilinearità e alternanza che abbiamo richiesto al determinante impongono, per una qualunque matrice 2×2

$$\det A = \det \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}$$

Scriviamo le colonne di A come combinazione lineare dei vettori (colonna) e_1, e_2 della base canonica di \mathbb{R}^2 . Allora:

$$\begin{aligned} \det[v_1, v_2] &= \det[a_{11}e_1 + a_{21}e_2, a_{12}e_1 + a_{22}e_2] \\ &= a_{11}a_{12} \det[e_1, e_1] + a_{11}a_{22} \det[e_1, e_2] + a_{21}a_{12} \det[e_2, e_1] + a_{21}a_{22} \det[e_2, e_2] \\ &= a_{11}a_{22} \det[e_1, e_2] + a_{21}a_{12} \det[e_2, e_1] \\ &= a_{11}a_{22} \det[e_1, e_2] - a_{21}a_{12} \det[e_1, e_2] \\ &= (a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}) \det[e_1, e_2] \\ &= a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} \end{aligned}$$

Osservazione. Si noti che la condizione di normalizzazione $\det[e_1, e_2] = 1$ è stata sfruttata solo nell'ultimo passaggio. Se si stabilisse $\det[e_1, e_2] = k$ (k numero qualunque) la funzione determinante risulterebbe moltiplicata per k . In altri termini, *le proprietà di multilinearità e di alternanza da sole bastano a caratterizzare il determinante a meno di una costante moltiplicativa.*

Con le matrici di ordine n arbitrario si procede in modo del tutto analogo. Si vede allora che (sempre ammesso che una funzione \det con le proprietà richieste esista) per ogni matrice $A = (a_{ij})$ si deve avere:

$$\det A = \sum_{\sigma \in S_n} \text{segno}(\sigma) a_{\sigma(1),1} a_{\sigma(2),2} \cdots a_{\sigma(n),n} \quad (4.1.2)$$

dove σ varia nel gruppo S_n delle permutazioni dell'insieme di indici $\{1, \dots, n\}$. Il numero $\text{segno}(\sigma)$, detto il *segno* della permutazione σ , vale 1 oppure -1 , a seconda che per passare dalla permutazione $\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(n)$ alla permutazione fondamentale $1, 2, \dots, n$ occorra un numero pari o un numero dispari di scambi.

Esistenza. A questo punto, per provare l'esistenza, c'è un'unica scelta possibile: non resta che porre *per definizione*

$$\det A = \sum_{\sigma \in S_n} \text{segno}(\sigma) a_{\sigma(1),1} a_{\sigma(2),2} \cdots a_{\sigma(n),n}$$

Resta però da dimostrare che la funzione determinante, definita in questo modo, è multilineare, alternante e il suo valore sulla matrice identità è 1. La verifica di questi fatti non è difficile. ■

Osservazione. Le coppie di indici che compaiono in ogni termine della somma 4.1.2 possono essere così disposte:

$$\begin{array}{ccccccc} \sigma(1) & \sigma(2) & \cdot & \cdot & \cdot & \sigma(n) & \\ 1 & 2 & \cdot & \cdot & \cdot & n & \end{array} \quad (4.1.3)$$

Per la proprietà commutativa del prodotto, è possibile riordinare i termini $a_{\sigma(1),1} a_{\sigma(2),2} \cdots a_{\sigma(n),n}$ in modo tale che i primi indici descrivano la permutazione fondamentale $1, 2, \dots, n$. Otterremo allora termini del tipo $a_{1,\tau(1)} a_{2,\tau(2)} \cdots a_{n,\tau(n)}$. La disposizione delle coppie degli indici sarà allora:

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 2 & \cdot & \cdot & \cdot & n & \\ \tau(1) & \tau(2) & \cdot & \cdot & \cdot & \tau(n) & \end{array} \quad (4.1.4)$$

Per passare dallo schema 4.1.3 allo schema 4.1.4 si eseguono simultaneamente scambi tra indici sovrapposti. Dunque le due permutazioni σ e τ hanno lo stesso segno. Ne segue:

$$\det A = \sum_{\sigma \in S_n} \text{segno}(\tau) a_{1,\tau(1)} a_{2,\tau(2)} \cdots a_{n,\tau(n)} \quad (4.1.5)$$

L'espressione 4.1.5 non è che il determinante della trasposta della matrice A . Abbiamo allora dimostrato che, per ogni matrice quadrata A ,

$$\det A = \det {}^t A \quad (4.1.6)$$

²Per i dettagli, si veda ad esempio: R. Betti, *Lezioni di Geometria*, Parte Prima, Masson, 1995.

4.1.2 Calcolo del determinante

Il calcolo esplicito del determinante di una matrice con l'espressione 4.1.2 è impraticabile (tranne che per $n = 2$).

Il determinante di una matrice $n \times n$ si può calcolare in termini di determinanti di matrici $(n-1) \times (n-1)$ mediante un procedimento ricorsivo detto *sviluppo di Laplace* (usato talvolta per definire il determinante stesso). Sia A una matrice di ordine n e sia A_{ij} la matrice $(n-1) \times (n-1)$ che si ottiene cancellando la riga di posto i e la colonna di posto j di A . La matrice A_{ij} è detta un *minore* di ordine $n-1$ della matrice A ; precisamente, A_{ij} è detta il *minore complementare* dell'elemento a_{ij} di A . Ad esempio, se

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 4 & -3 \\ 2 & 4 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

allora

$$A_{23} = \begin{vmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 0 \end{vmatrix}, \quad A_{31} = \begin{vmatrix} 4 & -3 \\ 4 & 0 \end{vmatrix}$$

Vale allora la seguente

Proposizione 4.1.4 (Sviluppo di Laplace) *Sia A una qualunque matrice $n \times n$ e i un qualunque indice (di riga) tra 1 e n . Allora*

$$\det A = \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} \det A_{ij} \quad (4.1.7)$$

(Sviluppo di Laplace secondo la riga i -esima)

³⁾ Poiché $\det A = \det {}^t A$, vale anche lo *sviluppo di Laplace secondo la j -esima colonna*:

$$\det A = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} \det A_{ij} \quad (4.1.8)$$

Se chiamiamo *complemento algebrico* dell'elemento a_{ij} il numero $(-1)^{i+j} \det A_{ij}$, concludiamo che *il determinante di una matrice è dato dalla somma dei prodotti degli elementi di una qualunque riga (o colonna) per i propri complementi algebrici*.

Esempio. Calcoliamo il determinante della matrice

$$A = \begin{vmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 5 \\ -1 & 4 & 2 \end{vmatrix}$$

Sviluppando secondo la seconda colonna, troviamo

$$\det A = 2 \det \begin{vmatrix} 3 & 1 \\ -1 & 2 \end{vmatrix} - 4 \det \begin{vmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = 2(6 - (-1)) - 4(15 - 1) = -42$$

³Per la dimostrazione: R. Betti, *Lezioni di Geometria*, Parte Prima, Masson, 1995.

Un altro modo di calcolare il determinante di una matrice consiste nel trasformarla in una matrice triangolare superiore mediante operazioni elementari sulle righe, tenendo però conto dell'effetto che queste operazioni hanno sul determinante:

1. Se si moltiplica una riga per un numero $\lambda \neq 0$ il determinante viene moltiplicato per λ ;
2. Se si somma alla riga i -esima un multiplo della riga j -esima, con $i \neq j$, il determinante non cambia;
3. Se si scambiano di posto due righe il determinante cambia segno.

Esempio.

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 3 & 0 & 1 \\ 1 & 4 & 2 \end{vmatrix} \simeq \begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 0 & -6 & -5 \\ 0 & 2 & 0 \end{vmatrix} \simeq \begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 0 & -6 & -5 \\ 0 & 0 & -5/3 \end{vmatrix} = A'$$

Abbiamo compiuto solo operazioni che non alterano il determinante, quindi

$$\det A = \det A' = 1 \cdot (-6) \cdot (-5/3) = 10$$

Esercizio. Dimostrare che il determinante di una matrice triangolare superiore è il prodotto degli elementi sulla diagonale principale.

4.1.3 Il determinante del prodotto

Teorema 4.1.5 (di Binet) *Se A e B sono due qualunque matrici quadrate dello stesso ordine, allora*

$$\det(AB) = (\det A)(\det B) \quad (4.1.9)$$

Dimostrazione. Sia A una qualunque matrice fissata $n \times n$. Consideriamo la funzione

$$\Phi : M(n \times n) \longrightarrow \mathbb{R}, \quad X \longmapsto \Phi(X) = \det(AX)$$

Proviamo che la funzione Φ soddisfa le due proprietà di omogeneità e invarianza per scorrimento.

1. (*Omogeneità*). Se scriviamo $X = [X_1, \dots, X_n]$, dove X_1, \dots, X_n sono le colonne della matrice X , allora $AX = [AX_1, \dots, AX_n]$. Se λ è un qualunque numero, abbiamo allora:

$$\Phi([\lambda X_1, \dots, X_n]) = \det[\lambda AX_1, \dots, AX_n] = \lambda \Phi([X_1, \dots, X_n]).$$

2. (*Invarianza per scorrimento*) Per ogni numero λ e per ogni indice $j \neq 1$

$$\begin{aligned} \Phi([X_1 + \lambda X_j, X_2, \dots, X_n]) &= \det[A(X_1 + \lambda X_j), AX_2, \dots, AX_n] \\ &= \det[AX_1 + \lambda AX_j, AX_2, \dots, AX_n] \\ &= \det[AX_1, AX_2, \dots, AX_n] = \Phi([X_1, \dots, X_n]) \end{aligned}$$

Ne segue che la funzione Φ è proporzionale alla funzione determinante:

$$\det(AX) = k \det X$$

Ponendo $X = I$, si ricava $k = \det A$ e quindi

$$\det(AX) = \det A \det X$$

uguaglianza che coincide con la 4.1.9. ■

Per una dimostrazione più concettuale del teorema di Binet si veda la sezione 4.3.

Definizione 4.1.6 *Sia $T : V \longrightarrow V$ un operatore di uno spazio vettoriale finito-dimensionale V . Il determinante di T è il determinante di una qualunque matrice che rappresenta T (rispetto a qualche base di V): lo denoteremo $\det T$.*

Il determinante di un operatore è indipendente dalla scelta di una base, e quindi la definizione data sopra è corretta, perché matrici che rappresentano lo stesso operatore hanno lo stesso determinante. Infatti se A e B rappresentano lo stesso operatore T rispetto a due basi diverse, allora sono simili (si veda 1.10.6) cioè esiste una matrice invertibile P per la quale $B = P^{-1}AP$, e quindi, per il teorema di Binet 4.1.9:

$$\det B = \det(P^{-1}AP) = (\det P^{-1})(\det A)(\det P) = \det A$$

Il significato intrinseco del determinante di un operatore sarà illustrato più avanti.

Proposizione 4.1.7 *Sia $T : V \longrightarrow V$ un operatore di uno spazio vettoriale V di dimensione finita. Allora T è un isomorfismo se e solo se $\det T \neq 0$.*

Dimostrazione. Fissiamo una base \mathcal{B} di V e sia A la matrice che rappresenta T rispetto a tale base. Allora T è invertibile se e solo se la matrice A è invertibile, cioè se e solo se $\det A \neq 0$. (Si veda 4.1.2).

4.2 Orientamento di uno spazio vettoriale

Sia V uno spazio vettoriale di dimensione n . Consideriamo una base $\mathcal{B}_t = (a_1(t), \dots, a_n(t))$ di V costituita da vettori $a_1(t), \dots, a_n(t)$ che non sono fissi, ma variabili in modo continuo nel tempo. Il parametro t descrive un intervallo $[a, b]$ dell'asse reale; non è restrittivo assumere che $[a, b]$ sia l'intervallo $[0, 1] \subset \mathbb{R}$. In termini più rigorosi:

Definizione 4.2.1 *Una base variabile con continuità di V è un'applicazione*

$$\mathcal{B} : [0, 1] \longrightarrow V^n, \quad t \longmapsto \mathcal{B}_t = (a_1(t), \dots, a_n(t)) \quad (4.2.1)$$

con le proprietà seguenti:

- 1) *l'applicazione \mathcal{B} è continua;*
- 2) *per ogni istante $t \in [0, 1]$, i vettori $(a_1(t), \dots, a_n(t))$ costituiscono una base di V .*

Se $\mathcal{B} : [0, 1] \longrightarrow V^n$ è una base variabile con continuità, si dice che la base

$$\mathcal{B}_0 = (a_1(0), \dots, a_n(0))$$

viene *deformata* con continuità nella base

$$\mathcal{B}_1 = (a_1(1), \dots, a_n(1))$$

Esempio. $\mathcal{B}_t = ((1+t, 0), (1-t, 1))$, con $t \in [0, 1]$, è una base variabile con continuità di \mathbb{R}^2 . Possiamo pensare a \mathcal{B}_t come a una deformazione della base $\mathcal{B}_0 = ((1, 0), (1, 1))$ nella base $\mathcal{B}_1 = ((2, 0), (0, 1))$.

Esempio. $\mathcal{B}_t = ((1, 0, 0), (0, \cos \pi t, \sin \pi t), (0, -\sin \pi t, \cos \pi t))$, $t \in [0, 1]$, è una base di \mathbb{R}^3 variabile con continuità che deforma la base

$$\mathcal{B}_0 = ((1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1))$$

nella base

$$\mathcal{B}_1 = (1, 0, 0), (0, -1, 0), (0, 0, -1)$$

Due basi \mathcal{A}_0 e \mathcal{A}_1 di V si dicono *omotope* se sono deformabili con continuità l'una nell'altra, cioè se esiste una base variabile con continuità

$$\mathcal{B} : [0, 1] \longrightarrow V^n, \quad t \longmapsto \mathcal{B}_t = (a_1(t), \dots, a_n(t))$$

tale che all'istante $t = 0$ coincida con \mathcal{A}_0 e all'istante $t = 1$ coincida con \mathcal{A}_1 .

Ad esempio, due basi del piano \mathbb{R}^2 che si ottengono una dall'altra mediante una rotazione (nel piano) sono omotope. Invece le due basi $v_1 = (1, 0), v_2 = (0, -1)$ e $e_1 = (1, 0), e_2 = (0, 1)$ non sono omotope. Ne daremo una dimostrazione più avanti. Intuitivamente: con una deformazione continua si può certamente portare v_1 su e_1 e v_2 su e_2 : ma, nel corso della deformazione, i due vettori v_1 e v_2 devono trovarsi, in almeno un istante, lungo una stessa retta. E quando questo accade, essi non costituiscono più una base di \mathbb{R}^2 .

Nell'insieme di tutte le basi di V , la relazione di omotopia è una relazione di equivalenza (ossia è riflessiva, simmetrica e transitiva). Si dimostra⁴ che *le classi di equivalenza sono esattamente due*. Detto altrimenti, l'insieme delle basi è ripartito in due classi e, date due basi, esse possono essere deformate l'una nell'altra se e solo se esse appartengono alla stessa classe. Più precisamente si dimostra il seguente:

Teorema 4.2.2 *Siano \mathcal{B} e \mathcal{B}' basi di uno spazio vettoriale V e sia $P = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(1_V)$. Allora \mathcal{B} e \mathcal{B}' sono omotope se e solo se $\det P > 0$.*

Un *orientamento* di uno spazio vettoriale V è una scelta (arbitraria) di una delle due classi di equivalenza di basi di V . Le basi della classe scelta vengono dette *positivamente orientate*; le altre si dicono *negativamente orientate*. Quando $V = \mathbb{R}^n$ la scelta standard consiste nel dire che la base canonica (e_1, \dots, e_n) (e tutte quelle ad essa omotope) è positivamente orientata.

Il teorema 4.2.2 permette ora di stabilire facilmente, attraverso il calcolo di un determinante, se una base di \mathbb{R}^n è o meno positivamente orientata.

⁴Si veda: M. Berger, *Geometry I*, Springer, 1994.

Esempio. La base $((1, -1), (2, 2))$ di \mathbb{R}^2 è positivamente orientata in quanto $\det \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 2 \end{vmatrix} = 4 > 0$. (Basta infatti una rotazione di $\pi/4$, seguita da opportune contrazioni delle lunghezze, per portare la base data a sovrapporsi a quella canonica, preservando a ogni istante l'indipendenza lineare.)

Esempio. Siano $v_1 = (1, 0)$, $v_2 = (0, -1)$. Allora la base (v_1, v_2) è negativamente orientata perché $\det \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} = -1 < 0$.

$$v_1 = (1, 0), v_2 = (0, -1)$$

4.3 Interpretazione geometrica del determinante

Chiamiamo *parallelepipedo* (o n -parallelepipedo) con spigoli $v_1, \dots, v_n \in \mathbb{R}^n$ il sottoinsieme di \mathbb{R}^n :

$$\{c_1 v_1 + \dots + c_n v_n \mid 0 \leq c_i \leq 1 \quad i = 1, \dots, n\}$$

Per $n = 2$ il parallelepipedo si chiamerà *parallelogramma*. Possiamo così sintetizzare le nostre nozioni sul determinante⁵:

1) *Il determinante di una matrice quadrata è il volume orientato del parallelepipedo i cui spigoli sono le colonne della matrice.*

Il valore assoluto del numero $\det A$ è dunque il volume del parallelepipedo i cui spigoli sono le colonne della matrice A . Inoltre:

- $\det A > 0$ se (v_1, \dots, v_n) è una base positivamente orientata di \mathbb{R}^n ;
- $\det A < 0$ se (v_1, \dots, v_n) è una base negativamente orientata di \mathbb{R}^n ;
- $\det A = 0$ se le colonne di A sono linearmente dipendenti.

Esempio. Per $n = 2$, il determinante $\det \begin{vmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{vmatrix}$ è l'area del parallelogramma generato dai vettori colonna $v_1 = (x_1, y_1)$ e $v_2 = (x_2, y_2)$, presa con il segno positivo se la base v_1, v_2 dà lo stesso orientamento della base canonica (e_1, e_2) , e presa con il segno negativo altrimenti. (Si intende che il determinante è zero se invece le colonne sono linearmente dipendenti.)

Data una matrice A di ordine n , consideriamo l'operatore $A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n, X \mapsto AX$ (moltiplicazione a sinistra per A). La colonna i -esima della matrice A è l'immagine Ae_i del vettore e_i della base canonica di \mathbb{R}^n . Quindi A trasforma il cubo unitario (e_1, \dots, e_n) nel parallelepipedo i cui spigoli sono le colonne della matrice A . Pertanto:

2) *Il determinante dell'operatore $A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ è il volume orientato dell'immagine del cubo unitario.*

Tenuto conto che il cubo unitario è l'unità di volume, l'ultima affermazione va letta nel

⁵V.I. Arnold, *Ordinary Differential Equations*, Springer-Verlag, 1992.

modo seguente: a meno del segno, $\det A$ è un *rapporto fra volumi*:

$$\text{Valore assoluto di } \det A = \frac{\text{Volume dell'immagine del cubo unitario}}{\text{Volume del cubo unitario}}$$

Sotto questa forma l'affermazione si generalizza, sulla base delle seguenti considerazioni euristiche. Sia $\Phi \subset \mathbb{R}^n$ una qualunque figura di \mathbb{R}^n . Si approssimi il volume della figura inscrivendo in essa tanti cubetti sempre più piccoli (metodo di esaustione di Archimede). Se si trasforma la figura mediante un operatore lineare A , il volume di ogni cubetto viene moltiplicato per $\det A$. Di conseguenza il volume dell'intera figura cambia per lo stesso fattore moltiplicativo $\det A$:

$$\text{Valore assoluto di } \det A = \frac{\text{Volume dell'immagine } A(\Phi)}{\text{Volume di } \Phi} \quad (4.3.1)$$

In breve:

3) *Il determinante di un operatore A è il coefficiente per il quale cambiano i volumi.*

Si noti che la forma di una figura può cambiare notevolmente per effetto di una trasformazione lineare: non è affatto ovvio geometricamente (nemmeno nel caso del piano) che il volume di tutte le figure venga moltiplicato per una stessa costante moltiplicativa.

Esempio. Sia $A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ un operatore. La condizione $\det A = 1$ equivale al fatto che A preserva i volumi e l'orientamento. Questo è il caso, ad esempio, delle matrici di rotazione

$$\begin{vmatrix} \cos t & -\sin t \\ \sin t & \cos t \end{vmatrix}$$

o delle matrici

$$\begin{vmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

dove a è un qualunque numero. (Si dia un'interpretazione geometrica di questi operatori.) Gli operatori rappresentati dalle matrici

$$A = \begin{vmatrix} \cos t & \sin t \\ \sin t & -\cos t \end{vmatrix}$$

($\det A = -1$) preservano i volumi, ma non l'orientamento. Essi rappresentano una rotazione di un angolo t , seguita dalla riflessione rispetto alla retta generata da $(\sin t, \cos t)$.

Esempio. Consideriamo l'operatore $A : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ rappresentato dalla matrice

$$A = \begin{vmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{vmatrix}$$

Per effetto dell'operatore A , il punto generico (x, y) ha come immagine $(u, v) = (ax, by)$. La circonferenza unitaria $S^1 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 = 1\}$ si trasforma nell'*ellisse*

$$A(S^1) = \{(u, v) \in \mathbb{R}^2 \mid \frac{u^2}{a^2} + \frac{v^2}{b^2} = 1\}$$

Il rapporto fra l'area della regione di piano racchiusa dall'ellisse e l'area del cerchio unitario (uguale a $\pi 1^2 = \pi$) è uguale a $\det A = ab$:

$$\frac{\text{area della regione di piano racchiusa dall'ellisse}}{\pi} = \det A = ab$$

Ne segue che l'area della regione di piano racchiusa dall'ellisse è πab .

Osservazione. L'uguaglianza $\det(AB) = (\det A)(\det B)$ (si veda 4.1.9) può essere ora facilmente spiegata: abbiamo visto che il valore assoluto del determinante è il fattore di scala per cui cambiano i volumi. Se si effettua la trasformazione composta AB (prima la trasformazione B , seguita dalla trasformazione A) i volumi cambieranno allora per un fattore di scala uguale a $(\det A)(\det B)$. (Ad esempio, se l'operatore A ingrandisce i volumi di un fattore 2 e l'operatore B li ingrandisce di un fattore 3, l'operatore composto AB ingrandisce i volumi di un fattore $2 \cdot 3$.) Tenuto conto che l'operatore composto AB cambia l'orientamento se e solo se esattamente uno degli operatori A, B lo cambia, si vede poi che l'uguaglianza 4.1.9 vale anche in segno.

4.4 Esercizi

Esercizio 4.4.1 Sia A una matrice $n \times n$ e sia λ un numero. Quanto vale $\det(\lambda A)$?

Esercizio 4.4.2 Siano A e B matrici $n \times n$. È vero che $\det(A + B) = \det A + \det B$?

Esercizio 4.4.3 Stabilire i valori del parametro k per i quali i vettori $(1, 0, 2)$, $(1, k, -1)$, $(k, 0, 3)$ sono linearmente dipendenti.

Esercizio 4.4.4 Trovare l'area del triangolo con vertici $(4, 3)$, $(8, 1)$, $(5, 5)$.

Esercizio 4.4.5 Spiegare geometricamente qual è la relazione tra l'area A del triangolo con vertici

$$\begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} c_1 \\ c_2 \end{vmatrix}$$

e il volume V del tetraedro definito dai vettori

$$\begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} c_1 \\ c_2 \\ 1 \end{vmatrix}.$$

Esercizio 4.4.6 Siano $A = (a_1, a_2)$ e $B = (b_1, b_2)$ due punti distinti del piano. Spiegare perché l'insieme delle soluzioni (x, y) dell'equazione

$$\det \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x & a_1 & b_1 \\ y & a_2 & b_2 \end{vmatrix} = 0$$

è la retta che passa per i punti A e B .

Esercizio 4.4.7 Scrivere sotto forma di determinante un'equazione per la retta passante per i punti $A = (3, 2)$ e $B = (1, -2)$.

Esercizio 4.4.8 Trovare l'area con segno del parallelogramma $P(v_1, v_2)$ nei casi seguenti:

- 1) $v_1 = (1, 0)$, $v_2 = (0, 1)$.
- 2) $v_1 = (a, 0)$, $v_2 = (0, b)$, dove a, b sono numeri reali qualsiasi.
- 3) $v_1 = (a, b)$, $v_2 = (0, c)$, dove a, b, c sono numeri reali qualsiasi.

Esercizio 4.4.9 *Dimostrare che, se la matrice A è invertibile, allora*

$$\det A^{-1} = \frac{1}{\det A}.$$

Si dia un'interpretazione geometrica.

Esercizio 4.4.10 (Determinante di matrici triangolari.) *Facendo uso di un disegno e dell'interpretazione geometrica del determinante come volume orientato, convincersi che*

$$\det \begin{vmatrix} x_1 & x_2 \\ 0 & y_2 \end{vmatrix} = x_1 y_2 \quad e \quad \det \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ 0 & y_2 & y_3 \\ 0 & 0 & z_3 \end{vmatrix} = x_1 y_2 z_3.$$

Esercizio 4.4.11 *Spiegare geometricamente perché il determinante della matrice*

$$\begin{vmatrix} a & c \\ 0 & b \end{vmatrix}$$

non dipende dal numero c .

Esercizio 4.4.12 *Dimostrare che*

$$\det \begin{vmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & b & b^2 \\ 1 & c & c^2 \end{vmatrix} = (c-a)(b-a)(c-b)$$

Esercizio 4.4.13 *Sia A una matrice ortogonale. Dimostrare che $\det A = 1$ oppure $\det A = -1$.*

Capitolo 5

Autovettori e Autovalori

5.1 Introduzione

Ricordiamo come si rappresenta un operatore $F : V \longrightarrow V$ di uno spazio vettoriale finito-dimensionale V mediante una matrice:

- 1) si fissa una (qualunque) base $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ di V ;
- 2) si scrive ogni vettore $F(v_j)$, $j = 1, \dots, n$, come combinazione lineare dei vettori della base \mathcal{B} stessa:

$$F(v_j) = a_{1j}v_1 + a_{2j}v_2 + \dots + a_{nj}v_n$$

La matrice $M_{\mathcal{B}}(F)$ che rappresenta F rispetto alla base \mathcal{B} ha come colonna di posto j le

coordinate $\begin{vmatrix} a_{1j} \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{nj} \end{vmatrix}$ di $F(v_j)$ rispetto alla base \mathcal{B} .

Naturalmente, se si cambia la base, cambia in generale anche la matrice che rappresenta l'operatore. Precisamente, se \mathcal{B}' è un'altra base e $P = M_{\mathcal{B}'}^{1_V}(1_V)$, allora la nuova matrice $A' = M_{\mathcal{B}'}(F)$ è data da

$$A' = P^{-1}AP.$$

Se l'operatore descrive una trasformazione rispetto alla quale alcune direzioni dello spazio giocano un ruolo privilegiato (ad esempio per motivi di simmetria), la scelta di vettori di base lungo quelle direzioni rende la matrice dell'operatore di più facile lettura. In particolare, supponiamo che esista un vettore non nullo v_1 di V che venga trasformato da F in un multiplo di se stesso: $F(v_1) = \lambda_1 v_1$. Diremo in tal caso che v_1 è un autovettore di F . Se si sceglie una base in cui il primo vettore è un autovettore (ammesso che ne esista uno), la prima colonna di $M_{\mathcal{B}}(F)$ sarà

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \end{vmatrix}$$

Il caso più favorevole si ha quando esiste una base $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ di V in cui ogni v_j è un

autovettore: $F(v_j) = \lambda_j v_j$, $j = 1, \dots, n$. La matrice $M_{\mathcal{B}}(F)$ è allora in forma diagonale:

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \end{vmatrix}$$

In tal caso l'operatore F si dice *diagonalizzabile*.

Esempio. Sia V uno spazio vettoriale euclideo di dimensione due (diciamo il piano ordinario della geometria euclidea, in cui si sia fissata un'origine) e sia W un sottospazio di dimensione uno (una retta per l'origine). Sia $F : V \rightarrow V$ la simmetria ortogonale rispetto alla retta W , cioè l'unico operatore che fissa i vettori di W e manda ogni vettore di W^\perp nel suo opposto. Due direzioni, W e W^\perp , sono ovviamente privilegiate per motivi di simmetria. Convienne allora scegliere una base $\mathcal{B} = (v_1, v_2)$ con $v_1 \in W$ e $v_2 \in W^\perp$. Poiché

$$F(v_1) = v_1 \quad \text{e} \quad F(v_2) = -v_2,$$

la matrice che rappresenta F rispetto alla base \mathcal{B} è

$$M_{\mathcal{B}}(F) = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

Si noti che ognuno dei due vettori v_1, v_2 è un autovettore (viene mandato in un multiplo di se stesso). L'operatore F è dunque diagonalizzabile.

Esempio. Rotazione nel piano. Sia $R_\theta : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ la rotazione di un angolo θ attorno all'origine, ossia l'operatore rappresentato, rispetto alla base ortonormale (e_1, e_2) di \mathbb{R}^2 , dalla matrice

$$\begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix}$$

Se $0 < \theta < \pi$, non esiste alcun vettore non nullo che venga trasformato dalla rotazione di un angolo θ in un suo multiplo, quindi l'operatore R_θ non è diagonalizzabile. Se invece $\theta = 0$ oppure $\theta = \pi$, l'operatore R_θ è diagonalizzabile ed è rappresentato, rispetto a una qualsiasi base, rispettivamente dalle matrici diagonali

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

In questo capitolo vediamo sotto quali condizioni un operatore si può rappresentare, rispetto a opportune basi, mediante una matrice diagonale.

5.2 Autovalori e autovettori

Sia $F : V \rightarrow V$ un operatore di uno spazio vettoriale V .

Definizione 5.2.1 Un vettore v di V si dice un autovettore dell'operatore F se:

- 1) $v \neq 0$
- 2) esiste un numero λ per il quale $F(v) = \lambda v$.

Un numero λ si dice autovalore di F se esiste un vettore non nullo $v \in V$ tale che $F(v) = \lambda v$.

Per ogni autovalore λ di F si chiama autospazio V_λ relativo all'autovalore λ il sottospazio

$$V_\lambda = \{v \in V \mid F(v) = \lambda v\} \quad (5.2.1)$$

Autovettori e autovalori di una matrice quadrata A , di tipo $n \times n$, sono definiti come autovettori e autovalori dell'operatore $L_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, moltiplicazione a sinistra per A :

Definizione 5.2.2 Un vettore v di \mathbb{R}^n si dice un autovettore della matrice quadrata A , di tipo $n \times n$, se:

- 1) $v \neq 0$;
- 2) esiste un numero λ per il quale $Av = \lambda v$.

Un numero λ si dice autovalore di A se esiste un vettore non nullo $v \in \mathbb{R}^n$ tale che $Av = \lambda v$. Per ogni autovalore λ di una matrice A si chiama autospazio V_λ relativo all'autovalore λ il sottospazio

$$V_\lambda = \{v \in \mathbb{R}^n \mid Av = \lambda v\} \quad (5.2.2)$$

L'autospazio V_λ è dunque costituito dal vettore nullo e da tutti gli autovettori relativi a λ .

Osservazione. Sia v un autovettore di un operatore F (o di una matrice A). Allora esiste un unico numero λ per il quale $F(v) = \lambda v$. Infatti, da $F(v) = \lambda v$ e $F(v) = \mu v$, segue $(\lambda - \mu)v = 0$, da cui $\lambda = \mu$ (Qui è essenziale l'ipotesi $v \neq 0$). Se $v \neq 0$ e $F(v) = \lambda v$, diremo che λ è l'autovalore associato all'autovettore v , oppure che v è un autovettore relativo all'autovalore λ .

Esempio. Siano $A = \begin{vmatrix} 1 & 6 \\ 5 & 2 \end{vmatrix}$, $u = \begin{vmatrix} 6 \\ -5 \end{vmatrix}$, $v = \begin{vmatrix} 3 \\ -2 \end{vmatrix}$. Vogliamo stabilire se u e v sono autovettori di A . Ora:

$$Au = \begin{vmatrix} 1 & 6 \\ 5 & 2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 6 \\ -5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -24 \\ 20 \end{vmatrix} = -4 \begin{vmatrix} 6 \\ -5 \end{vmatrix} = -4u.$$

Dunque u è un autovettore di A , relativo all'autovalore $\lambda = -4$.

$$Av = \begin{vmatrix} 1 & 6 \\ 5 & 2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 3 \\ -2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -9 \\ 11 \end{vmatrix}$$

Ne segue che v non è autovettore di A , perché Av non è multiplo di v .

Esempio. Sia $V = C^\infty(\mathbb{R})$ lo spazio vettoriale delle funzioni $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ infinitamente differenziabili e sia $F = \frac{d}{dt}$ l'operatore di derivata. Sia $f \in C^\infty(\mathbb{R})$ la funzione definita da $f(t) = \exp(\lambda t)$. Abbiamo $\frac{d}{dt}f(t) = \lambda f(t)$. Dunque, per ogni λ , la funzione $\exp(\lambda t)$ è un autovettore dell'operatore di derivata, relativo all'autovalore λ .

Esempio. Gli autovettori di una matrice diagonale. Si consideri la matrice diagonale

$$A = \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{vmatrix}$$

È immediato verificare che i vettori $e_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$, $e_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}$, $e_3 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$ sono autovettori di A ; i relativi autovalori sono $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Dato un operatore $F : V \longrightarrow V$ (con V di dimensione finita), supponiamo che esista una base (v_1, \dots, v_n) di V costituita da autovettori di F . In tal caso, poiché

$$F(v_1) = \lambda_1 v_1, \dots, F(v_n) = \lambda_n v_n,$$

la matrice che rappresenta F rispetto alla base di autovettori (v_1, \dots, v_n) è la matrice diagonale:

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \end{vmatrix}$$

Definizione 5.2.3 Si dice che un operatore $F : V \longrightarrow V$ è diagonalizzabile se esiste una base \mathcal{B} di V costituita da autovettori di F , ovvero, in modo equivalente, se esiste una base \mathcal{B} di V rispetto alla quale la matrice che rappresenta F è diagonale. In tal caso diremo che \mathcal{B} è una base che diagonalizza l'operatore F .

Una matrice quadrata A , $n \times n$, si dice diagonalizzabile se è diagonalizzabile l'operatore $L_A : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n, X \longmapsto AX$ (moltiplicazione a sinistra per A). In modo equivalente, una matrice A è diagonalizzabile se esiste una matrice invertibile P tale che $D = P^{-1}AP$ è una matrice diagonale.

(Se \mathcal{B} è una base che diagonalizza L_A e \mathcal{E} è la base canonica di \mathbb{R}^n , allora $P = M_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}}(1_{\mathbb{R}^n})$ è la matrice dell'identità di \mathbb{R}^n dalla base \mathcal{B} alla base \mathcal{E}).

5.3 Il polinomio caratteristico

Nella ricerca degli autovettori di un operatore $F : V \longrightarrow V$, occorre distinguere il caso di spazi vettoriali reali da quello di spazi vettoriali sul campo complesso. Nel seguito, salvo avviso contrario, supporremo che V sia uno spazio vettoriale *reale*. Sia $F : V \longrightarrow V$ un operatore di uno spazio vettoriale V di dimensione finita. Fissiamo una base \mathcal{B} di V e sia $A = M_{\mathcal{B}}(F)$ la matrice che rappresenta F rispetto alla base \mathcal{B} . In questo modo la ricerca di un autovettore dell'operatore F si trasforma nella ricerca di un autovettore della matrice A : bisogna vedere per quali numeri λ esistano soluzioni non nulle $X \in \mathbb{R}^n$ del sistema $AX = \lambda X$, che equivale a

$$(A - \lambda I)X = 0 \tag{5.3.1}$$

dove I è la matrice identità. Ora la condizione necessaria e sufficiente perché il sistema lineare omogeneo 5.3.1 abbia una soluzione non nulla è che sia

$$\det(A - \lambda I) = 0 \tag{5.3.2}$$

(Infatti se $\det(A - \lambda I)$ fosse diverso da 0, la matrice $A - \lambda I$ sarebbe invertibile, quindi il sistema 5.3.1 avrebbe l'unica soluzione $X = (A - \lambda I)^{-1}0 = 0$.) Si dice che l'equazione 5.3.2 è l'*equazione caratteristica* della matrice A . Il polinomio

$$\Phi_A(\lambda) = \det(A - \lambda I) \tag{5.3.3}$$

si chiama *polinomio caratteristico* della matrice A . Abbiamo allora dimostrato:

Proposizione 5.3.1 *Sia λ un numero reale e sia A una matrice quadrata. Allora λ è autovalore di A se e solo se è radice del polinomio caratteristico $\det(A - \lambda I)$.*

Esempio. Il polinomio caratteristico della generica matrice 2×2

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$$

è

$$\det(A - \lambda I) = \lambda^2 - (a_{11} + a_{22})\lambda + a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} = \lambda^2 - (\text{tr } A)\lambda + \det A$$

Esempio. Sia

$$A = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 3 \\ -2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

Il polinomio caratteristico è

$$\det(A - \lambda I) = \begin{vmatrix} 1 - \lambda & -1 & 3 \\ -2 & 1 - \lambda & 1 \\ 0 & 1 & -1 - \lambda \end{vmatrix} = -\lambda^3 + \lambda^2 + 4\lambda - 6$$

Esempio. Gli autovalori di una matrice triangolare sono i termini sulla diagonale principale. Ad esempio, gli autovalori di

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 & * & * \\ 0 & \lambda_2 & * \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{vmatrix}$$

sono $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Nel calcolo degli autovalori, non importa quale base \mathcal{B} si scelga, e quindi quale sia la matrice $A = M_{\mathcal{B}}(F)$ che si usa per rappresentare l'operatore. Infatti se si sceglie un'altra base \mathcal{B}' , l'operatore F si rappresenta con la matrice $A' = M_{\mathcal{B}'}(F) = P^{-1}AP$, simile alla matrice A , e matrici simili hanno lo stesso polinomio caratteristico, come ora proviamo:

Proposizione 5.3.2 *Matrici simili hanno lo stesso polinomio caratteristico.*

Dimostrazione. Sia $A' = P^{-1}AP$. Allora

$$\begin{aligned} \Phi_{A'}(\lambda) &= \det(A' - \lambda I) \\ &= \det(P^{-1}AP - P^{-1}\lambda IP) \\ &= \det[P^{-1}(A - \lambda I)P] \\ &= \det P^{-1} \det(A - \lambda I) \det P = \det(A - \lambda I) = \Phi_A(\lambda) \end{aligned}$$

■

5.4 Matrici e operatori diagonalizzabili

Teorema 5.4.1 *Sia V uno spazio vettoriale e sia $F : V \longrightarrow V$ un operatore. Siano v_1, \dots, v_m autovettori di F , con autovalori $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ rispettivamente. Supponiamo che questi autovalori siano distinti, cioè*

$$\lambda_i \neq \lambda_j \quad \text{se } i \neq j.$$

Allora v_1, \dots, v_m sono linearmente indipendenti.

Dimostrazione. Per induzione su m . Se $m = 1$, un autovettore v_1 è un vettore non nullo, e quindi è linearmente indipendente. Sia $m > 1$. Supponiamo che c_1, \dots, c_m siano numeri per i quali

$$c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots + c_m v_m = 0 \tag{5.4.1}$$

Dobbiamo dimostrare che $c_1 = \dots = c_m = 0$. Applicando F ai due membri di 5.4.1 e ricordando che $F(v_j) = \lambda_j v_j$, otteniamo

$$c_1 \lambda_1 v_1 + c_2 \lambda_2 v_2 + \dots + c_m \lambda_m v_m = 0 \tag{5.4.2}$$

Moltiplicando 5.4.1 per λ_1 otteniamo

$$c_1 \lambda_1 v_1 + c_2 \lambda_1 v_1 + \dots + c_m \lambda_1 v_m = 0$$

Sottraendo le ultime due espressioni:

$$c_2(\lambda_2 - \lambda_1)v_2 + \dots + c_m(\lambda_m - \lambda_1)v_m = 0$$

L'ipotesi induttiva implica

$$c_2(\lambda_2 - \lambda_1) = \dots = c_m(\lambda_m - \lambda_1) = 0$$

Siccome $\lambda_j - \lambda_1 \neq 0$ per $j = 2, \dots, m$, concludiamo che $c_2 = \dots = c_m = 0$. Tornando alla relazione iniziale 5.4.1, vediamo che $c_1 v_1 = 0$ e quindi anche $c_1 = 0$. ■

Dal teorema precedente segue in particolare:

Teorema 5.4.2 *Se una matrice $n \times n$ (o un operatore di uno spazio vettoriale di dimensione n) ha n autovalori distinti, allora è diagonalizzabile.*

Dimostrazione. Siano v_1, \dots, v_n autovettori relativi agli autovalori $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ rispettivamente. Per il teorema precedente, gli n vettori v_1, \dots, v_n sono linearmente indipendenti e quindi costituiscono una base di autovettori. ■

Si noti che la condizione che gli autovalori siano distinti è sufficiente, ma non necessaria per la diagonalizzabilità, cioè una matrice può essere diagonalizzabile anche se possiede autovalori non tutti distinti fra loro. Esempio: la matrice

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}$$

è diagonalizzabile (è anzi già diagonale) pur avendo autovalori non tutti distinti.

Esempio. Nel piano \mathbb{R}^2 sia S la simmetria rispetto alla bisettrice $x - y = 0$, rappresentata, rispetto alla base canonica, dalla matrice

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Il polinomio caratteristico di A è $\Phi_A(\lambda) = \lambda^2 - 1$. La matrice A ha due autovalori distinti $\lambda_1 = 1$ e $\lambda_2 = -1$. Questo basta per dire che A è diagonalizzabile. Cerchiamo ora una base di autovettori. L'autospazio

$$V_{\lambda_1} = V_1 = \text{Ker}(A - I) = \{X \in \mathbb{R}^2 \mid (A - I)X = 0\}$$

relativo all'autovalore λ_1 è lo spazio delle soluzioni del sistema omogeneo

$$\begin{cases} -x + y = 0 \\ x - y = 0 \end{cases}$$

Dunque $V_1 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid (x, y) = t(1, 1) \ t \in \mathbb{R}\}$.

Analogamente si trova $V_{-1} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid (x, y) = t(1, -1) \ t \in \mathbb{R}\}$. Allora una base di autovettori è, ad esempio, $\mathcal{B} = ((1, 1), (1, -1))$. Rispetto a tale base, la matrice che rappresenta la simmetria S è la matrice diagonale

$$A' = P^{-1}AP = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

dove

$$P = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}$$

è la matrice (del cambio di base) le cui colonne sono la base di autovettori scelti.

Esempio. Consideriamo la rotazione di $\pi/2$ attorno all'origine del piano \mathbb{R}^2 , rappresentata, rispetto alla base canonica, dalla matrice

$$A = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Il polinomio caratteristico di A è $\Phi_A(\lambda) = \lambda^2 + 1$. La matrice A non ha autovalori reali (il polinomio caratteristico ha due radici distinte complesse $i, -i$) e quindi non è diagonalizzabile (sui reali).

Esempio. Consideriamo la matrice

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 4 \end{vmatrix}$$

Il suo polinomio caratteristico è $(4 - \lambda)(1 - \lambda^2)$ e quindi la matrice ammette un autovalore semplice $\lambda_1 = 4$ e un autovalore doppio $\lambda_2 = 1$. L'autospazio $V_4 = L(0, 0, 1)$ e quindi ha dimensione 1; anche $V_1 = L(3, 0, -1)$ ha dimensione 1. Allora si riesce a trovare al più due autovettori linearmente indipendenti e quindi la matrice A non è diagonalizzabile.

Esempio. Consideriamo la matrice

$$B = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 4 \end{vmatrix}$$

Il suo polinomio caratteristico è $(4 - \lambda)(1 - \lambda^2)$. La matrice ammette un autovalore semplice $\lambda_1 = 4$ e un autovalore doppio $\lambda_2 = 1$. L'autospazio $V_4 = L(0, 0, 1)$ ha dimensione 1. L'autospazio V_1 è il piano di \mathbb{R}^3 di equazione $x + 3z = 0$, e quindi ha dimensione 2. Possiamo allora trovare tre autovettori linearmente indipendenti, uno relativo all'autovalore $\lambda_1 = 4$ e gli altri due relativi all'autovalore $\lambda_2 = 4$. Dunque esiste una base di \mathbb{R}^3 costituita da autovettori della matrice A e quindi A è diagonalizzabile.

Sia A una matrice e λ un suo autovalore. La *molteplicità algebrica* di λ è la molteplicità di λ come radice del polinomio caratteristico $\det(A - \lambda I)$. (Ad esempio, il numero 1 è radice doppia del polinomio $(\lambda - 1)^2(\lambda - 4)$, è radice di molteplicità tre di $(\lambda - 1)^3(\lambda - 2)$ eccetera. Più precisamente, si dice che un numero λ_0 è radice di molteplicità r di un polinomio $P(\lambda)$ se $P(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)^r Q(\lambda)$, dove $Q(\lambda)$ è un polinomio che non si annulla in λ_0 .) Si dice invece *molteplicità geometrica* di un autovalore λ la dimensione dell'autospazio V_λ . Si dimostra che la molteplicità geometrica di un autovalore è minore o uguale alla molteplicità algebrica. Un autovalore λ si dice *regolare* se la sua molteplicità geometrica è uguale alla sua molteplicità algebrica. Premesse queste definizioni, enunciamo, senza dimostrazione, una condizione necessaria e sufficiente perché una matrice, o un operatore, sia diagonalizzabile.

Teorema 5.4.3 *Sia A una matrice reale. Allora A è diagonalizzabile (sul campo reale) se e solo se:*

- 1) *A ammette n autovalori reali;*
- 2) *ogni autovalore è regolare (cioè le sue molteplicità algebrica e geometrica coincidono).*

Enunciamo anche un altro teorema che garantisce la diagonalizzabilità di un'importante classe di matrici, quelle simmetriche. Per tali matrici è garantita inoltre l'esistenza di una base di autovettori che sia ortonormale.

Teorema 5.4.4 *Sia A una qualunque matrice simmetrica reale di ordine n . Allora:*

- 1) *Gli autovalori di A sono tutti reali;*
- 2) *Autovettori relativi a autovalori distinti sono ortogonali;*
- 3) *Esiste una base ortonormale di \mathbb{R}^n costituita da autovettori di A .*

Esempio. Si consideri la matrice simmetrica $A = \begin{vmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{vmatrix}$. I suoi autovalori sono 1 e 3. L'autospazio $V_1 = \text{Ker}(A - I)$ è costituito dai multipli del vettore $(1, 1)$, mentre $V_3 = \text{Ker}(A - 3I)$ è costituito dai multipli del vettore $(1, -1)$. Si noti che i due autospazi sono ortogonali. Una base ortonormale di autovettori è, ad esempio, da $((1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}), (1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2}))$.

5.4.1 Esercizi

Esercizio 5.4.5 Dire se il vettore $v = \begin{vmatrix} -2 \\ -8 \end{vmatrix}$ è autovettore della matrice $A = \begin{vmatrix} -3 & 1 \\ -3 & 8 \end{vmatrix}$. In caso affermativo, trovare l'autovalore.

Soluzione. Abbiamo $Av = \begin{vmatrix} -3 & 1 \\ -3 & 8 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -2 \\ -8 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2 \\ -58 \end{vmatrix}$. Il vettore v non è autovettore della matrice A , perché Av non è multiplo di v .

Esercizio 5.4.6 Dire se $v = \begin{vmatrix} 4 \\ -3 \\ 1 \end{vmatrix}$ è autovettore di $A = \begin{vmatrix} 3 & 7 & 9 \\ -4 & -5 & 1 \\ 2 & 4 & 4 \end{vmatrix}$. In caso affermativo, trovare l'autovalore.

Soluzione. $Av = \begin{vmatrix} 3 & 7 & 9 \\ -4 & -5 & 1 \\ 2 & 4 & 4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 4 \\ -3 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$. Poiché $Av = 0 = 0 \cdot v$, v è autovettore di A , relativo all'autovalore 0. In generale si noti che un qualunque vettore non nullo appartenente al nucleo di una matrice (o di un operatore) è autovettore relativo all'autovalore 0.

Esercizio 5.4.7 Dimostrare che gli autovettori della matrice $B = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$ sono esattamente tutti i multipli non nulli di $(1, 0)$ e che pertanto A non è diagonalizzabile.

Esercizio 5.4.8 Dire se la seguente affermazione è vera o falsa: "Se due matrici quadrate A, B hanno lo stesso polinomio caratteristico e A è diagonalizzabile, allora anche B è diagonalizzabile. (Suggerimento: Si consideri $A = I$ e si tenga conto dell'esercizio 5.4.7).

Teorema 5.4.9 (Eulero) Ogni matrice ortogonale di ordine tre con determinante uguale a 1 rappresenta una rotazione attorno a un asse (passante per l'origine).

In termini più meccanici, ogni movimento rigido che fissa un punto è una rotazione attorno a una retta passante per quel punto.

Dimostrazione. Sia A una matrice che soddisfa le ipotesi del teorema. Dimostriamo che A ammette l'autovalore 1. Il polinomio caratteristico di A è di terzo grado e quindi ha necessariamente almeno una radice reale λ_1 . Se le altre due radici λ_2 e λ_3 non sono reali, allora λ_1 deve essere positivo perché $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = \det A = 1$ e il prodotto delle radici λ_2 e λ_3 , che sono complesse coniugate, è positivo. Del resto la lunghezza dei vettori non cambia, quindi se v è un autovettore relativo a λ_1 , si ha

$$\|v\| = \|Av\| = \|\lambda_1 v\| = |\lambda_1| \|v\| \quad (5.4.3)$$

Si deduce $\lambda_1 = 1$. Se il polinomio caratteristico ha tre radici reali deduciamo (ancora da 5.4.3 che il loro valore assoluto è 1. I casi possibili sono $(1, 1, 1)$ oppure $(1, -1, -1)$, dato che il loro prodotto deve essere $\det A = 1$. Come si vede, in ogni caso la matrice A ha l'autovalore 1. Esiste dunque una retta, chiamiamola r , che viene fissata dalla matrice A . Sul piano ortogonale a questa retta l'operatore L_A induce una trasformazione rappresentata da una matrice ortogonale di ordine due con determinante 1 (Omettiamo i dettagli); sappiamo già che una tale trasformazione è una rotazione. La matrice A rappresenta allora una rotazione attorno alla retta r . ■

Esercizio 5.4.10 Sia $A = \begin{vmatrix} 5 & 0 & 3 \\ 0 & -1 & 0 \\ 4 & 0 & 1 \end{vmatrix}$.

- a) Stabilire se A è diagonalizzabile per similitudine (sui reali).
 b) Trovare una base per ogni autospazio di A .

Soluzione. a) Il polinomio caratteristico di A è $(1+\lambda)^2(\lambda-7)$. Gli autovalori sono: $\lambda_1 = -1$ (doppio) e $\lambda_2 = 7$. La molteplicità geometrica di $\lambda_1 = -1$ è:

$$\begin{aligned} m.g.(-1) &= \dim \ker (A - (-1)I) \\ &= 3 - \text{rk} \begin{vmatrix} 6 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 2 \end{vmatrix} && (\text{nullità} + \text{rango}) \\ &= 3 - 1 = 2. \end{aligned}$$

Poiché $m.g.(-1) = m.a.(-1)$, la matrice A è diagonalizzabile per similitudine (sui reali).

b) Per definizione, l'autospazio $V_{-1} = \text{Ker} (A + I)$ è il sottospazio di \mathbb{R}^3 costituito dalla soluzioni del sistema omogeneo $(A+I)X = 0$. La matrice $A+I = \begin{vmatrix} 6 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 2 \end{vmatrix}$ ha rango 1 e il sistema $(A+I)X = 0$ si riduce alla singola equazione $2x + z = 0$. Una base di V_{-1} è:

$$(0, 1, 0), (1, 0, -2).$$

Analogamente, l'autospazio $V_7 = \text{Ker} (A - 7I)$ è rappresentato in forma cartesiana dalle equazioni:

$$\begin{cases} -2x + 3z = 0 \\ -8y = 0 \end{cases} \quad (5.4.4)$$

Una base di V_7 è una qualunque soluzione non nulla di 5.4.4. Ad esempio, $(3, 0, 2)$.

Appendice A

Temi d'esame svolti

A.1 Tema 1

Vero o Falso?

1. L'applicazione $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $F(x, y) = x$ per ogni $(x, y) \in \mathbb{R}^2$, è iniettiva.
2. Il vettore $v = (0, 1)$ è autovettore della matrice $\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$.
3. Ogni sistema lineare di due equazioni in tre incognite rappresenta una retta di \mathbb{R}^3 .
4. Se A è una matrice $n \times n$ e $\text{rk } A \leq n - 1$, allora $\det A = 0$.
5. Siano V uno spazio vettoriale e W un sottoinsieme di V che non sia un sottospazio vettoriale. Allora esistono almeno due vettori $w, w' \in W$ la cui somma $w + w'$ non appartiene a W .

Risposte

1. Falso. Ad esempio, i due punti distinti $(0, 0)$ e $(0, 1)$ hanno la stessa immagine: $F(0, 0) = 0 = F(0, 1)$.
2. Falso. Il prodotto della matrice A per il vettore (colonna) $v = (0, 1)$ è $(1, 0)$, che non è multiplo di v .
3. Falso. Ad esempio l'insieme delle soluzioni del sistema $\begin{cases} x + y + z = 1 \\ x + y + z = 2 \end{cases}$ è l'insieme vuoto.
4. Vero. Se $\text{rk } A \leq n - 1$, allora le n colonne di A sono linearmente dipendenti e quindi $\det A = 0$.
5. Falso. Ad esempio, il semipiano $W = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y \geq 0\}$ non è un sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^2 , però è chiuso rispetto alla somma, vale a dire, se w e w' appartengono a W , allora anche $w + w'$ appartiene a W .

Esercizi

Esercizio A.1.1 Sia $T : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare rappresentata, rispetto alla base canonica, dalla matrice $A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$.

- 1) Scrivere (se esiste) un qualunque vettore non nullo $w \in \mathbb{R}^3$ per il quale si abbia $T(w) = w$.
- 2) Trovare $Sol(A, b)$, dove $b = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$.
- 3) Esiste una base di \mathbb{R}^3 costituita da autovettori della matrice A ?
- 4) Dire se il vettore $(1, 3, 1)$ appartiene al sottospazio $\text{Im } T$.

Soluzione. 1) Un vettore w non nullo tale che $T(w) = w$ è un autovettore di T relativo all'autovalore 1. Dalla prima colonna di A , leggiamo che $\lambda = 1$ è autovalore della matrice A e un relativo autovettore è $w = (1, 0, 0)$.

2) $Sol(A, b) = \{(2, 0, 1)\}$.

3) L'operatore T ha tre autovalori distinti: $-1, 1, 2$. Questo è sufficiente per garantire che T è diagonalizzabile.

4) $\text{Im } T = \mathbb{R}^3$, perché $\det A \neq 0$. In particolare $w = (1, 3, 1)$ appartiene a $\text{Im } T$.

Esercizio A.1.2 Sia $L : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare definita da $L(x, y) = (-x - y, x - y, x)$ per ogni $(x, y) \in \mathbb{R}^2$.

- 1) Trovare $\dim \text{Im } L$.
- 2) Trovare $\ker L$.
- 3) Fissate le basi $\mathcal{B} = ((1, 0), (0, 1))$ di \mathbb{R}^2 e

$$\mathcal{C} = (e'_1, e'_2, e'_3) = ((0, 1, 0), (1, 0, 0), (0, 0, 1)),$$

di \mathbb{R}^3 , scrivere la matrice $M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(L)$.

Soluzione. 1) La matrice che rappresenta L rispetto alle basi canoniche è

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

Allora $\dim \text{Im } L = \text{rk } A = 2$.

2) $\ker L = Sol(A, 0) = \{(0, 0)\}$.

3) Abbiamo:

$$e_1 = e'_2, \quad e_2 = e'_1, \quad e_3 = e'_3,$$

dove (e_1, e_2, e_3) è la base canonica di \mathbb{R}^3 . Allora:

$$\begin{aligned} T(1, 0) &= (-1, 1, 1) &= -e_1 + e_2 + e_3 &= e'_1 - e'_2 + e'_3 \\ T(0, 1) &= (-1, -1, 0) &= -e_1 - e_2 &= -e'_1 - e'_2. \end{aligned}$$

Ne segue:

$$M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(L) = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Esercizio A.1.3 Nello spazio affine euclideo \mathbb{R}^3 sono assegnati il punto $P = (0, 3, 4)$ e i due piani π e π' di equazioni $x - y - z - 1 = 0$ e $3x - y + z - 1 = 0$.

- 1) Scrivere equazioni parametriche per una retta passante per P e parallela a entrambi i piani π e π' .
- 2) Trovare la distanza del piano $x - y - z - 1 = 0$ dall'origine.

Soluzione. 1) L'intersezione $\pi \cap \pi' = s$ è una retta di vettore di direzione $(1, 2, -1)$. La retta cercata deve essere parallela a s , e quindi ha equazioni parametriche:

$$r : \begin{cases} x = t \\ y = 3 + 2t \\ z = 4 - t \end{cases}$$

2) La distanza del piano $x - y - z - 1 = 0$ dall'origine è $1/\sqrt{3}$.

Esercizio A.1.4 *Motivando la risposta, si dica se la seguente proposizione è vera o falsa: "Se A è una matrice quadrata di ordine n e $\det A = 0$, allora il sistema lineare $AX = 0$ ha almeno una soluzione non nulla".*

Soluzione. L'affermazione è vera. Se $\det A = 0$, allora le colonne A^1, \dots, A^n della matrice A sono linearmente dipendenti. Esistono allora n numeri c_1, \dots, c_n non tutti nulli, tali che

$$c_1 A^1 + \dots + c_n A^n = 0 \quad (\text{A.1.1})$$

Questo equivale a dire che il vettore (c_1, \dots, c_n) è una soluzione non nulla del sistema lineare omogeneo $AX = 0$.

Esercizio A.1.5 *Sia*

$$\mathcal{D} = \{A = (A_{ij}) \in M(n \times n, \mathbb{R}) \mid A_{ij} = 0 \text{ se } i \neq j\}.$$

Motivando le risposte, si dica se le affermazioni seguenti sono vere o false.

- 1) Per ogni $A \in \mathcal{D}$, A è invertibile.
- 2) Per ogni $A, B \in \mathcal{D}$, anche $AB \in \mathcal{D}$.

Soluzione. 1) Falso. Per esempio, la matrice nulla appartiene a \mathcal{D} , ma non è invertibile.

2) Vero. Siano $A, B \in \mathcal{D}$ e $C = AB$. Se $i \neq j$, gli addendi della somma

$$C_{ij} = \sum_{s=1}^n A_{is} B_{sj}$$

sono tutti nulli: infatti, se $s \neq i$, il numero $A_{is} = 0$ è zero, mentre se $s = i$ è $B_{ij} = 0$.

A.2 Tema 2

Vero o Falso?

1. Denotiamo con I_n la matrice identità $n \times n$. Allora, per ogni n , $\det(-I_n) = -1$.
2. Se A, B sono matrici arbitrarie $n \times n$, allora $\det(AB) = \det(BA)$.
3. L'insieme $U = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x - z = 0, y = 1\}$ è un sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^3 .
4. L'angolo tra i vettori $v = (1, 0, 2)$ e $w = (0, 1, -1)$ è minore di un angolo retto.
5. Se x, y sono soluzioni di un sistema lineare non omogeneo, allora $x + y$ non è mai soluzione dello stesso sistema.

Risposte

1. Falso. $\det(-I_n) = (-1)^n \det(I_n) = (-1)^n$.

2. Vero. Abbiamo

$$\det AB = (\det A)(\det B) = (\det B)(\det A) = \det BA.$$

($\det A$ e $\det B$ sono due numeri e quindi $(\det A)(\det B) = (\det B)(\det A)$).

3. Falso. U è l'insieme delle soluzioni di un sistema lineare *non omogeneo*, e quindi non è un sottospazio: ad esempio, non contiene il vettore nullo.

4. Falso. Basta calcolare il prodotto scalare $v \cdot w$: se tale numero è positivo, allora l'angolo è minore di un angolo retto; se invece è negativo, allora l'angolo è compreso tra un angolo retto e un angolo piatto. Nel nostro caso $v \cdot w = -2$, e quindi l'angolo tra v e W non è minore di un angolo retto.

5. Vero. Supponiamo che $x, y \in \text{Sol}(A, b)$ siano soluzioni di uno stesso sistema lineare non omogeneo, con matrice dei coefficienti A e termine noto $b \neq 0$. Questo significa che $Ax = b$ e $Ay = b$. Allora

$$A(x + y) = Ax + Ay = b + b = 2b \neq b$$

e quindi $x + y \notin \text{Sol}(A, b)$.

Esercizi

Esercizio A.2.1 Siano $U = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x - 3y + z = 0\}$ e

$W = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid -2x + y - z = 0\}$.

1) Trovare una base ortonormale del sottospazio vettoriale $U \cap W$.

2) Trovare $\dim(U + W)$.

Soluzione. 1) Poiché il sottospazio $U \cap W$ è una retta passante per l'origine, una sua base è una qualunque soluzione non nulla del sistema omogeneo

$$\begin{cases} x - 3y + z = 0 \\ -2x + y - z = 0 \end{cases}$$

Ad esempio: $(-2, 1, 5)$. Una base ortonormale di $U \cap W$ è costituita dal vettore normalizzato

$$\frac{1}{\sqrt{30}}(-2, 1, 5).$$

2) Per la formula di Grassmann,

$$\dim(U + W) = \dim U + \dim W - \dim(U \cap W) = 2 + 2 - 1 = 3.$$

Esercizio A.2.2 Sia $V = \{A = (a_{ij}) \in \mathcal{M}(3 \times 3, \mathbb{R}) \mid a_{ij} = 0 \text{ se } i \neq j\}$ lo spazio vettoriale delle matrici diagonali 3×3 . Scrivere una base di V

Soluzione. Una base di V è data dalle tre matrici

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Esercizio A.2.3 Sia $\mathbb{R}_2[x]$ lo spazio vettoriale dei polinomi di grado minore o uguale a due e sia W il sottospazio generato dai polinomi

$$p_1(x) = 1 + x^2, \quad p_2(x) = -x^2, \quad p_3(x) = 2 + x^2.$$

Scrivere una base di W .

Soluzione. La matrice

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

le cui righe sono le componenti di $p_1(x), p_2(x), p_3(x)$ rispetto alla base canonica $1, x, x^2$, ha rango due. Le prime due righe sono linearmente indipendenti; quindi una base di W è costituita, ad esempio, dai due polinomi $p_1(x) = 1 + x^2, p_2(x) = -x^2$.

Esercizio A.2.4 Nello spazio affine \mathbb{R}^3 , si considerino i punti $A = (1, 0, 1), B = (0, 0, 1), C = (0, 1, 1)$.

- 1) Dire se A, B, C sono allineati.
- 2) Scrivere un'equazione cartesiana di un piano contenente A, B e C .

Soluzione. 1) I tre punti A, B, C non sono allineati, perché i vettori $B - A = (-1, 0, 0)$ e $C - A = (-1, 1, 0)$ non sono proporzionali.

- 2) Un'equazione cartesiana del piano contenente A, B e C è $z - 1 = 0$.

Esercizio A.2.5 Sia r la retta di equazioni cartesiane

$$\begin{cases} x - y + z - 1 = 0 \\ 2x + y - z + 1 = 0 \end{cases}$$

- 1) Trovare un vettore di direzione di r .
- 2) Scrivere un'equazione cartesiana di un piano passante per l'origine e ortogonale a r .

Soluzione. 1) Un vettore di direzione di r è una qualunque soluzione non nulla del sistema omogeneo

$$\begin{cases} x - y + z = 0 \\ 2x + y - z = 0 \end{cases}$$

Ad esempio, $(0, 1, 1)$.

- 2) Esiste un unico piano passante per l'origine e ortogonale a r . Un'equazione cartesiana di tale piano è $y + z = 0$.

Esercizio A.2.6 Sia $U = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid 2x + y + z = 0\}$ e sia W il sottospazio di \mathbb{R}^3 generato dal vettore $w = (1, 0, -2)$.

- 1) Dire se l'unione insiemistica $U \cup W$ è un sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^3 .
- 2) Trovare $\dim(U + W)$.

Soluzione. 1) Poiché il vettore $w = (1, 0, -2)$ appartiene a U , il sottospazio W è incluso in U ; quindi $U \cup W = U$ è un sottospazio vettoriale di \mathbb{R}^3 .

- 2) Poiché $W \subset U$, si ha $U + W = U$; quindi $\dim(U + W) = 2$.

Esercizio A.2.7 Dire se la seguente affermazione è vera o falsa, giustificando la risposta: "Non esiste alcuna matrice reale 2×2 antisimmetrica di rango 1".

Soluzione. L'affermazione è vera. Una matrice 2×2 antisimmetrica è del tipo

$$A = \begin{vmatrix} 0 & a \\ -a & 0 \end{vmatrix}$$

dove a è un qualunque numero reale. Se $a \neq 0$, allora $\det A = a^2 \neq 0$, e quindi $\text{rk } A = 2$. Se invece $a = 0$, $\text{rk } A = 0$.

A.3 Tema 3

Vero o Falso?

1. Se A è una qualunque matrice ortogonale, allora $|\det A| = 1$.
2. Se $V = \{A \in \mathcal{M}(3 \times 3) \mid A \text{ diagonale}\}$ e $L : V \rightarrow \mathbb{R}^3$ un'applicazione lineare iniettiva, allora L è suriettiva.
3. La matrice $A = \begin{vmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix}$ è ortogonale.
4. Se A è una matrice 3×2 e $\text{rk } A = 1$, allora il complemento ortogonale dello spazio generato dalle righe ha dimensione 1.
5. Se A è una matrice 3×2 e $\text{rk } A = 2$, allora $\text{Sol}(A, b) \neq \emptyset$ per ogni $b \in \mathbb{R}^3$.

Risposte

1. Vero. Se la matrice A è ortogonale, vale a dire se A è invertibile e $A^{-1} = {}^t A$, allora:

$$\begin{aligned} |\det A|^2 &= \det A \det A \\ &= \det A \det {}^t A \\ &= \det A \det A^{-1} \\ &= \det(AA^{-1}) \\ &= \det I \\ &= 1. \end{aligned}$$

Pertanto $|\det A| = 1$.

2. Vero. Se X e Y sono spazi vettoriali di dimensione finita, $L : X \rightarrow Y$ è un'applicazione lineare e $\dim X = \dim Y$, allora L è suriettiva se e solo è iniettiva. Nel nostro caso $\dim V = \dim \mathbb{R}^3 = 3$.
3. Falso. Una matrice è ortogonale quando ogni riga ha lunghezza 1 e due righe distinte sono ortogonali. La matrice A non soddisfa nessuna di queste due condizioni.
4. Vero. Se $\text{rk } A = 1$, lo spazio W generato dalle righe di A è un sottospazio di dimensione 1 di \mathbb{R}^2 . Pertanto il complemento ortogonale W^\perp ha dimensione 1.
5. Falso. Il sottospazio vettoriale W di \mathbb{R}^3 generato dalle colonne di A ha dimensione 2 (= $\text{rk } A$). Per ogni vettore $b \in \mathbb{R}^3$ che non appartiene a W , il sistema $AX = b$ non ha soluzioni. Ad esempio, il sistema

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

non ha soluzioni.

Esercizi

Esercizio A.3.1 Siano L_A e L_B gli operatori di \mathbb{R}^3 rappresentati, rispetto alla base canonica, dalle matrici

$$A = \begin{vmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}, \quad B = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}.$$

- 1) Stabilire se l'operatore L_A è diagonalizzabile.
- 2) Dire se esiste una base di \mathbb{R}^3 costituita da autovettori di L_B ; in caso affermativo, trovarne una.

Soluzione. 1) La matrice A ha un autovalore $\lambda = 2$ con molteplicità algebrica 3 e molteplicità geometrica 1; quindi non è diagonalizzabile.

2) La matrice B ha gli autovalori distinti $1, 3, -1$, e pertanto è diagonalizzabile. Una base di \mathbb{R}^3 costituita da autovettori di L_B è ad esempio:

$$(1, 0, 0), (1, 1, 0), (1, 0, -2).$$

Esercizio A.3.2 Scrivere una base dello spazio $\text{Sol}(A, 0)$, dove

$$A = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 2 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 2 & -1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Soluzione. Una base dello spazio $\text{Sol}(A, 0)$ è costituita dal vettore $(-1, 1, 1, 0)$.

Esercizio A.3.3 Sia $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare definita da

$$F(x, y) = (x - y, 0, 2x - 2y),$$

e sia $G: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare definita da

$$G(x, y, z) = (x, 0, x - z).$$

- 1) Trovare una base di $\text{Im } F$.
- 2) Trovare una base di $\ker F$.
- 3) Dette rispettivamente \mathcal{C}_2 e \mathcal{C}_3 le basi canoniche di \mathbb{R}^2 e di \mathbb{R}^3 , scrivere la matrice $M_{\mathcal{C}_3}^{\mathcal{C}_2}(G \circ F)$.

Soluzione. 1) Una base di $\text{Im } F$ è $(1, 0, 2)$.

2) Una base di $\ker F$ è $(1, 1)$.

3) La matrice che rappresenta l'applicazione $G \circ F$ è

$$M_{\mathcal{C}_3}^{\mathcal{C}_2}(G \circ F) = \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \\ -1 & 1 \end{vmatrix}.$$

Esercizio A.3.4 In \mathbb{R}^3 si considerino le basi $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$ e $\mathcal{B}' = (e'_1, e'_2, e'_3)$, dove

$$e'_1 = e_3, \quad e'_2 = e_1 - e_2, \quad e'_3 = e_2.$$

Sia $F: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'operatore definito da:

$$F(e_1) = e_1 + e_2, \quad F(e_2) = e_3, \quad F(e_3) = 0.$$

- 1) Trovare $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F)$.
- 2) Trovare $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(F)$.
- 3) Sia v il vettore di \mathbb{R}^3 le cui coordinate, rispetto alla base \mathcal{B}' , sono $[v]_{\mathcal{B}'} = (1, 0, 1)$. Scrivere le coordinate $[v]_{\mathcal{B}}$ di v rispetto alla base \mathcal{B} .

Soluzione. 1) Per trovare, ad esempio, la prima colonna di $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F)$, scriviamo $F(e_1)$ come combinazione lineare di e_1, e_2, e_3 :

$$F(e_1) = e_1 + e_2 + 0 \cdot e_3 :$$

la prima colonna è costituita dai coefficienti:

$$\begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Allo stesso modo troviamo le altre colonne:

$$M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

2) Ricaviamo:

$$e_1 = e'_2 + e'_3, \quad e_2 = e'_3, \quad e_3 = e'_1.$$

Quindi:

$$\begin{aligned} F(e'_1) &= F(e_3) = 0 \\ F(e'_2) &= F(e_1 - e_2) = F(e_1) - F(e_2) = e_1 + e_2 - e_3 = -e'_1 + e'_2 + 2e'_3 \\ F(e'_3) &= F(e_2) = e_3 = e'_1. \end{aligned}$$

Ne segue:

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(F) = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \end{vmatrix}$$

3) Poiché

$$v = e'_1 + e'_3 = e_3 + e_2,$$

abbiamo $[v]_{\mathcal{B}} = (0, 1, 1)$.

Esercizio A.3.5 1) Sia $F : V \rightarrow W$ un'applicazione lineare. Dimostrare che $\ker F$ è un sottospazio vettoriale di V .

2) Sia $\mathcal{B} = (v_1, v_2, v_3)$ una base di uno spazio vettoriale V e sia $v \in V$. Come sono definite le coordinate di v rispetto alla base \mathcal{B} ?

3) Siano V uno spazio vettoriale reale e $F : V \rightarrow V$ un operatore. Cosa si intende per autovettore di F ?

A.4 Tema 4

Vero o Falso?

1. Il sottoinsieme $U = \left\{ \begin{vmatrix} a & b \\ 0 & -b \end{vmatrix}, a, b \in \mathbb{R} \right\}$ è un sottospazio vettoriale dello spazio $M(2 \times 2)$ delle matrici 2×2 .

2. Per ogni matrice quadrata A , vale l'uguaglianza $\text{rk}(A^2) = (\text{rk } A)^2$.

3. Se il sistema lineare $Ax = 0$ ha almeno due soluzioni distinte, allora ha infinite soluzioni.

4. Se v_1, \dots, v_n è una base di \mathbb{R}^n , allora la matrice che ha come colonne v_1, \dots, v_n è invertibile.

5. Sia $\mathcal{C} = (e_1, e_2, e_3)$ la base canonica di \mathbb{R}^3 e sia $\mathcal{B} = (e_3, e_2, e_1)$. Allora $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}(Id) = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$.

Risposte

1. Vero. U è chiuso rispetto alla somma di matrici e alla moltiplicazione per uno scalare. Infatti

per ogni $X = \begin{vmatrix} a & b \\ 0 & -b \end{vmatrix} \in U$, per ogni $Y = \begin{vmatrix} c & d \\ 0 & -d \end{vmatrix} \in U$ e per ogni $\lambda \in \mathbb{R}$ si ha:

$$\begin{aligned} \text{i) } X + Y &= \begin{vmatrix} (a+c) & (b+d) \\ 0 & -(b+d) \end{vmatrix} \in U \\ \text{ii) } \lambda X &= \lambda \begin{vmatrix} a & b \\ 0 & -b \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (\lambda a) & (\lambda b) \\ 0 & -(\lambda b) \end{vmatrix} \in U \end{aligned}$$

Inoltre che $U \neq \emptyset$ (per esempio la matrice identicamente nulla appartiene ad U).

2. Falso. Controesempio: $A = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$.

Abbiamo $A^2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$, $\text{rk}(A^2) = 0$ mentre $(\text{rk } A)^2 = 1$.

3. Vero. Se x_1 e x_2 sono due soluzioni distinte del sistema $Ax = 0$ allora anche una loro qualunque combinazione lineare è soluzione. Infatti

$$\begin{aligned} A(\lambda x_1 + \mu x_2) &= A(\lambda x_1) + A(\mu x_2) \\ &= \lambda A(x_1) + \mu A(x_2) \\ &= 0 \end{aligned}$$

4. Vero. Se v_1, \dots, v_n è una base di \mathbb{R}^n le coordinate di tali vettori sono $v_1 = (1, 0, \dots, 0)$, $v_2 = (0, 1, \dots, 0)$, ..., $v_n = (0, 0, \dots, 1)$.

Pertanto la matrice che ha come colonne v_1, \dots, v_n è la matrice identità che è ovviamente invertibile (la sua inversa coincide con se stessa).

5. Vero. $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}(Id)$ è proprio la matrice che trasforma e_1 in e_3 (prima colonna di $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}(Id)$), e_2 in e_2 (seconda colonna di $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}(Id)$), e_3 in e_1 (terza colonna di $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}(Id)$).

Esercizi

Esercizio A.4.1 Sia $A = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$

- Trovare gli autovalori reali di A .
- Per ogni autovalore reale di A , scrivere una base del corrispondente autospazio.
- Esiste una base di \mathbb{R}^3 costituita da autovettori della matrice A ?

Soluzione. a) Il polinomio caratteristico di A è $\Phi_A(\lambda) = (1 - \lambda)(\lambda^2 + 1)$. L'unico autovalore reale è $\lambda_1 = 1$.

b) Abbiamo $V_{\lambda_1} = V_1 = \ker(A - I) = \{X = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid (A - I)X = 0\}$. Quindi l'autospazio V_1 è costituito dalle soluzioni del sistema

$$\begin{vmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = 0.$$

Una base di V_1 il vettore $(0, 0, 1)$.

c) Ovviamente non esiste una base di \mathbb{R}^3 costituita da autovettori di A perché gli unici autovettori di A sono i multipli non nulli del vettore $(0, 0, 1)$.

Esercizio A.4.2 Sia $\mathcal{B} = (v_1, v_2, v_3)$ una base di uno spazio vettoriale V e sia $F : V \rightarrow V$ l'operatore definito da

$$F(v_1) = v_1 + v_2 + v_3, \quad F(v_2) = v_1 + v_2, \quad F(v_3) = v_1.$$

- Dire se F è iniettivo.
- Scrivere $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F)$.
- Sia $v = 2v_1 - v_2 + v_3$. Scrivere le coordinate $[F(v)]_{\mathcal{B}}$ di $[F(v)]$ rispetto alla base \mathcal{B} .

b) Ricordiamo che se $F : V \rightarrow V$ è una qualunque applicazione lineare e $\mathcal{B} = (v_1, v_2, v_3)$ una base di V allora la matrice $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F)$ si ottiene disponendo in colonna le coordinate, rispetto alla base \mathcal{B} , dei vettori $F(v_1)$, $F(v_2)$, $F(v_3)$. In questo caso otteniamo

$$\begin{aligned} F(v_1) &= (1, 1, 1) \\ F(v_2) &= (1, 1, 0) \\ F(v_3) &= (1, 0, 0) \end{aligned}$$

e pertanto

$$M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

a) La matrice $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F)$ ha determinante diverso da zero. Quindi l'operatore F è iniettivo.

c)

$$[F(v)]_{\mathcal{B}} = M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F) [v]_{\mathcal{B}} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 2 \\ -1 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \end{vmatrix}$$

Esercizio A.4.3 a) Scrivere un vettore ortogonale al piano π di equazioni parametriche:

$$x = s - t, \quad y = s, \quad z = 2t$$

b) Scrivere un'equazione parametrica di una retta passante per i punti $(1, 2, 1)$ e $(3, 1, 0)$

Soluzione. a) L'equazione cartesiana del piano π si ottiene per esempio, ricavando s e t dalla seconda e terza equazione e sostituendo tali valori nella prima (cioè in $x = s - t$). Otteniamo $2x - 2y + z = 0$. Pertanto, un vettore ortogonale al piano π è $(2, -2, 1)$

b) La retta passante per $A(1, 2, 1)$ e $B(3, 1, 0)$ ha equazione parametrica $X = A + (B - A)t$, cioè

$$\begin{cases} x = 1 + 2t \\ y = 2 - t \\ z = 1 - t \end{cases}$$

A.5 Tema 5

Vero o Falso?

1. Se $\{v_1, v_2, v_3\}$ è un insieme di generatori di uno spazio vettoriale V e $\dim V = 3$, allora (v_1, v_2, v_3) è una base di V .
2. Il sottoinsieme $U = \{A \in M(2 \times 2, \mathbb{R}) \mid \det A = 0\}$ è un sottospazio vettoriale dello spazio vettoriale $M(2 \times 2, \mathbb{R})$.
3. Non esiste alcuna applicazione lineare iniettiva $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$.
4. Se A è una matrice quadrata e il sistema lineare $Ax = b$ ha almeno due soluzioni distinte, allora $\det A = 0$.
5. Se $A = (a_{ij})$ è una matrice e $a_{ij} = 1$ per ogni i, j , allora $\text{rk } A = 1$.

Risposte

1. Vero.
2. Falso. Il sottoinsieme U non è chiuso rispetto alla somma di matrici: ad esempio le matrici

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad B = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

appartengono a U , perché $\det A = \det B = 0$, mentre $A + B = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$ non appartiene a U , perché $\det(A + B) = -1$.

3. Vero. Per il teorema "nullità + rango":

$$\dim \ker F = \dim \mathbb{R}^3 - \dim \operatorname{Im} F = 3 - \dim \operatorname{Im} F \geq 1$$

(perché $\dim \operatorname{Im} F \leq 2$), e quindi l'applicazione lineare F non è iniettiva. (Un'applicazione lineare è iniettiva se e solo se $\ker F = \{0\}$).

4. Vero. Se fosse $\det A \neq 0$, il sistema ammetterebbe l'unica soluzione $A^{-1}b$.

5. Vero. La dimensione dello spazio vettoriale generato dalle righe (o dalle colonne) di A è uguale a 1.

Esercizi

Esercizio A.5.1 Sia r la retta di equazioni cartesiane

$$\begin{cases} x + 2y - 3z = 9 \\ x - 4y - z = 1 \end{cases}$$

- 1) Determinare un vettore di direzione di r .
- 2) Scrivere un'equazione cartesiana di un piano passante per il punto $P = (1, 2, 1)$ e ortogonale alla retta che contiene i punti $A = (1, 0, 0)$ e $B = (1, 1, 1)$.

Soluzione. 1) Un vettore di direzione della retta r è una qualunque soluzione non nulla del sistema lineare omogeneo

$$\begin{cases} x + 2y - 3z = 0 \\ -6y + 2z = 0 \end{cases}$$

Un vettore di direzione di r è, ad esempio, $(7, 1, 3)$.

2) Un vettore di direzione della retta che contiene i punti $A = (1, 0, 0)$ e $B = (1, 1, 1)$ è $B - A = (0, 1, 1)$; i piani ortogonali alla retta AB hanno equazione del tipo: $y + z + h = 0$, $h \in \mathbb{R}$. Un tale piano passa per il punto $P(1, 2, 1)$ se $2 + 1 + h = 0$, cioè se $h = -3$. Il piano richiesto ha dunque equazione $y + z - 3 = 0$.

Esercizio A.5.2 Sia $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare rappresentata, rispetto alla base canonica di \mathbb{R}^3 , dalla matrice

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 7 \\ -2 & 3 & 14 \\ 0 & -1 & -4 \end{vmatrix}$$

- 1) Scrivere una base del sottospazio $\ker F$
- 2) Scrivere una base del sottospazio $\operatorname{Im} F$

Soluzione. 1) $\ker F$ è il sottospazio delle soluzioni del sistema lineare omogeneo

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 7 \\ -2 & 3 & 14 \\ 0 & -1 & -4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Risolvendo il sistema, troviamo

$$\ker F = \{(t, -4t, t), \quad t \in \mathbb{R}\} = \{t(1, -4, 1), \quad t \in \mathbb{R}\}$$

Una base di $\ker F$ è costituita, ad esempio, dal vettore $(1, -4, 1)$.

2) Il sottospazio $\text{Im } F$ è generato dalle colonne di A e $\dim \text{Im } F = 3 - \dim \ker F = 2$. Una base di $\text{Im } F$ è allora costituita da due qualunque colonne linearmente indipendenti della matrice A ; ad esempio

$$\begin{vmatrix} 1 \\ -2 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 2 \\ 3 \\ -1 \end{vmatrix}.$$

Esercizio A.5.3 1) Sia $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l'applicazione lineare rappresentata, rispetto alla base canonica $\mathcal{E} = (e_1, e_2, e_3)$ di \mathbb{R}^3 , dalla matrice

$$M_{\mathcal{E}}^{\mathcal{E}}(F) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

1) Scrivere la matrice che rappresenta F rispetto alla base

$$\mathcal{B} = ((0, 1, 0), (1, -1, 0), (1, 0, 1)).$$

2) L'operatore F ha almeno un autovettore reale?

3) Dire se la matrice $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F)$ è ortogonale.

Soluzione. 1) La matrice di F rispetto alla base \mathcal{B} è

$$M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(F) = M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{E}}(Id_{\mathbb{R}^3}) M_{\mathcal{E}}^{\mathcal{E}}(F) M_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}}(Id_{\mathbb{R}^3})$$

dove $Id_{\mathbb{R}^3} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ è la funzione identità. Ora abbiamo:

$$M_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}}(Id_{\mathbb{R}^3}) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

(Le colonne sono le componenti dei vettori della base \mathcal{B} rispetto alla base canonica \mathcal{E}).

Per trovare $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{E}}(Id_{\mathbb{R}^3})$, dobbiamo scrivere i vettori e_1, e_2, e_3 della base canonica in termini dei vettori della base $\mathcal{B} = (v_1, v_2, v_3)$. Partiamo da:

$$\begin{aligned} v_1 &= (0, 1, 0) &= e_2 \\ v_2 &= (1, -1, 0) &= e_1 - e_2 \\ v_3 &= (1, 0, 1) &= e_1 + e_3 \end{aligned}$$

Risolvendo rispetto a e_1, e_2, e_3 , otteniamo:

$$\begin{aligned} e_1 &= v_1 + v_2 \\ e_2 &= v_1 \\ e_3 &= -v_1 - v_2 + v_3 \end{aligned}$$

Ne segue:

$$M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{E}}(Id_{\mathbb{R}^3}) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Otteniamo allora:

$$\begin{aligned}
M_B^B(F) &= M_B^\varepsilon(Id_{\mathbb{R}^3})M_{\varepsilon_3}^\varepsilon(L)M_\varepsilon^B(Id_{\mathbb{R}^3}) \\
&= \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\
&= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{vmatrix}
\end{aligned}$$

2) Il polinomio caratteristico di una qualunque matrice reale di ordine dispari ha sempre almeno una radice reale. Dunque l'operatore F ha almeno un autovalore reale e un autovettore reale.

3) La matrice $M_B^B(F)$ non è ortogonale.

Esercizio A.5.4 Scrivere una base dello spazio vettoriale $Sol(A, 0)$, dove $A = \begin{vmatrix} 1 & 2 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 2 & -2 & -1 \end{vmatrix}$

2) Il sistema $AX = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$ ha soluzioni?

Soluzione. Si trova:

$$Sol(A, 0) = \{(-2s + t, s, t, 4s - 3t), \quad s, t \in \mathbb{R}\} = \{s(-2, 1, 0, 4) + t(1, 0, 1, -3), \quad s, t \in \mathbb{R}\}$$

Una base di $Sol(A, 0)$ è costituita dai due vettori $(-2, 1, 0, 4)$ e $(1, 0, 1, -3)$.

2) Il sistema $AX = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$

non ha soluzioni, perché

$$\text{rk} \begin{vmatrix} 1 & 2 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 2 & -2 & -1 \end{vmatrix} < \text{rk} \begin{vmatrix} 1 & 2 & -1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 2 & -2 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

(Teorema di Rouché-Capelli).

Esercizio A.5.5 Trovare $Sol(A, 0)$, dove

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Soluzione. L'insieme delle soluzioni del sistema

$$A \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

è

$$Sol(A, 0) = \{(x_1, -2x_3, x_3, 0), \quad x_1, x_3 \in \mathbb{R}\}.$$

A.6 Tema 6

Verò o Falso?

1. Non esistono sottospazi vettoriali U, W di \mathbb{R}^4 , con $\dim U = \dim W = 3$, per i quali $U + W = \mathbb{R}^4$.
2. Fissato un qualunque vettore $u \in \mathbb{R}^3$, l'applicazione $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ definita, per ogni $v \in \mathbb{R}^3$, da $F(v) = u \cdot v$ (prodotto scalare) è lineare.
3. Sia $A \in M(n \times n)$. Se $\det A = 0$, allora per ogni $b \in \mathbb{R}^n$ il sistema $AX = b$ non è risolvibile.
4. Se l'intersezione di due piani nello spazio affine \mathbb{R}^3 contiene un punto, allora contiene una retta.

Risposte

1. Falso. Siano $U = L(e_1, e_2, e_3)$ e $W = L(e_1, e_2, e_4)$, dove (e_1, e_2, e_3, e_4) è la base canonica di \mathbb{R}^4 . Allora $\dim U = \dim W = 3$ e $U + W = \mathbb{R}^4$.
2. Vero. Occorre verificare:

$$\begin{aligned} a) \quad & F(v+w) = F(v) + F(w) \quad (\text{additività di } F) \\ b) \quad & F(\lambda v) = \lambda F(v) \quad (\text{omogeneità di } F) \end{aligned}$$

Infatti:

- a) $F(v+w) = u \cdot (v+w) = (u \cdot v) + (u \cdot w) = F(v) + F(w)$
 - b) $F(\lambda v) = u \cdot (\lambda v) = \lambda(u \cdot v) = \lambda F(v)$
3. Falso. Controesempio: se $b = 0$ il sistema $Ax = 0$ ha sempre la soluzione banale.
 4. Vero.

Esercizi

Esercizio A.6.1 Sia $D : \mathbb{R}_2[t] \rightarrow \mathbb{R}_2[t]$ l'operatore di derivazione e sia \mathcal{C} la base canonica di $\mathbb{R}_2[t]$.

- a) Scrivere la matrice $M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(D)$.
- b) L'operatore D è invertibile?
- c) L'operatore D è diagonalizzabile?

Soluzione.

a) Una base di $\mathbb{R}_2[t]$ è $(1, t, t^2)$. Le colonne della matrice $M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(D)$ sono le componenti, rispetto alla base \mathcal{C} , dei polinomi $D(1), D(t), D(t^2)$. Ora:

$$\begin{aligned} D(1) &= 0 \\ D(t) &= 1 = 1 \cdot 1 + 0 \cdot t + 0 \cdot t^2 \\ D(t^2) &= 2t = 0 \cdot 1 + 2 \cdot t + 0 \cdot t^2 \end{aligned}$$

Pertanto:

$$M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(D) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

- b) L'operatore D non è invertibile perché $\det M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(D) = 0$.
- c) Il polinomio caratteristico

$$\det(M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(D) - \lambda I) = -\lambda^3$$

ha l'unica radice $\lambda = 0$, con molteplicità algebrica 3 e molteplicità geometrica 1. Pertanto D non è diagonalizzabile.

Esercizio A.6.2 Sia π il piano di equazioni parametriche

$$\begin{cases} x = 3s + t \\ y = -t + 1 \\ z = 2s + 2 \end{cases}$$

- 1) Scrivere un'equazione cartesiana del piano parallelo a π e passante per l'origine.
- 2) Trovare un vettore normale a π .
- 3) Il punto $P = (1, 2, 3)$ appartiene a π ?

Soluzione.

1) Per determinare l'equazione cartesiana di π basta ricavare t ed s rispettivamente dalla seconda e terza equazione e sostituire tali valori nella prima. Si ottiene: $2x + 2y - 3z + 2 = 0$. Pertanto l'equazione cartesiana del piano parallelo a π e passante per l'origine è

$$2x + 2y - 3z = 0.$$

2) Un vettore normale a π è $(2, 2, -3)$.

3) Il punto P non appartiene al piano π perché le sue coordinate $(1, 2, 3)$ non soddisfano l'equazione del piano.

Esercizio A.6.3 Sia

$$U = \{(x, y, z, t) \in \mathbb{R}^4 \mid y + z - t = 0, z + t = 0, y + 2z = 0\}.$$

- 1) Scrivere una base per U .
- 2) Sia W il sottospazio di \mathbb{R}^4 generato dai vettori

$$e_1 = (1, 0, 0, 0), \quad e_2 = (0, 1, 0, 0), \quad e_3 = (0, 0, 1, 0).$$

Stabilire se $U + W = \mathbb{R}^4$.

Soluzione.

1) Per definizione, il sottospazio U di \mathbb{R}^4 è l'insieme delle soluzioni del seguente sistema (di tre equazioni in quattro incognite):

$$\begin{cases} y + z - t = 0 \\ z + t = 0 \\ y + 2z = 0 \end{cases}$$

Risolviendo il sistema, si ottiene

$$\begin{aligned} U &= \{(u, 2v, -v, v), \quad u, v \in \mathbb{R}\} \\ &= \{u(1, 0, 0, 0) + v(0, 2, -1, 1), \quad u, v \in \mathbb{R}\} \end{aligned}$$

Una base di U è $(1, 0, 0, 0), (0, 2, -1, 1)$.

- 3) Poiché $\dim(U \cap W) = 1$, dalla formula di Grassmann ricaviamo:

$$\dim(U + W) = \dim U + \dim W - \dim(U \cap W) = 2 + 3 - 1 = 4.$$

Quindi $U + W = \mathbb{R}^4$.

Esercizio A.6.4 Sia

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Trovare una soluzione non nulla del sistema $AX = 0$.

Soluzione. Posto $X = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{vmatrix}$ il sistema $AX = 0$ si scrive

$$\begin{cases} x_2 = 0 \\ 2x_3 = 0 \\ 3x_4 = 0 \end{cases}$$

L'insieme delle soluzioni è

$$\text{Sol}(A, 0) = \{(s, 0, 0, 0), \quad s \in \mathbb{R}\}$$

Una soluzione non nulla è $(1, 0, 0, 0)$.

A.7 Tema 7

Vero o Falso?

1. Per ogni coppia di vettori v, w dello spazio vettoriale euclideo \mathbb{R}^3 , se v è multiplo di w , allora $\text{dist}(v, w) = 0$.
2. Se (v_1, \dots, v_n) è una base ortonormale di \mathbb{R}^n e $v = a_1v_1 + \dots + a_nv_n$, allora $a_i = v \cdot v_i$, per ogni $i = 1, \dots, n$.
3. Le coordinate di $v = (-1, 0)$ rispetto alla base $(1, 1), (2, 1)$ di \mathbb{R}^2 sono $(-1, -1)$.
4. Siano $v_1 = (2, 2, 2)$, $v_2 = (2, 2, 0)$, $v_3 = (3, 0, 0)$. Allora il vettore $(10, 2, 4)$ è combinazione lineare di v_1, v_2, v_3 .
5. Se v e w sono autovettori distinti di un operatore T relativi allo stesso autovalore λ , allora $v - w$ è autovettore relativo all'autovalore λ .

Risposte

1. Falso.
2. Vero.
3. Falso.
4. Vero. I tre vettori v_1, v_2, v_3 sono linearmente indipendenti e quindi generano \mathbb{R}^3 : ogni vettore di \mathbb{R}^3 è combinazione lineare di v_1, v_2, v_3 .
5. Vero. Dall'ipotesi $Tv = \lambda v$ e $Tw = \lambda w$, segue $T(v - w) = \lambda(v - w)$. Dunque il vettore $v - w$ è autovettore relativo all'autovalore λ .

Esercizi

Esercizio A.7.1 Si considerino le seguenti basi di \mathbb{R}^3 :

$$\mathcal{C} = ((1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)) \quad e \quad \mathcal{B} = ((1, 0, -1), (0, -1, 0), (2, 1, 1))$$

- 1) Le coordinate di un vettore $v \in \mathbb{R}^3$ rispetto alla base \mathcal{C} sono $(2, 4, -1)$. Trovare le coordinate di v rispetto alla base \mathcal{B} .
- 2) Scrivere la matrice $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}(id)$ dell'identità $id: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ rispetto alla base \mathcal{C} (nel dominio) e \mathcal{B} (nel codominio).

Soluzione. 1) Le coordinate del vettore v rispetto alla base \mathcal{B} sono $(4/3, -11/3, 1/3)$.

2)

$$M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}(Id) = \begin{vmatrix} 1/3 & 0 & -2/3 \\ 1/3 & -1 & 1/3 \\ 1/3 & 0 & 1/3 \end{vmatrix}$$

Esercizio A.7.2 Si considerino i seguenti sottospazi vettoriali di \mathbb{R}^3 :

$U = L(1, 2, 3)$, $W = L(0, 1, 0)$.

- 1) Trovare $\dim(U + W)^{\perp}$.
- 2) Scrivere un vettore non nullo di $(U + W)^{\perp}$.

Soluzione. 1) Poiché $\dim(U + W) = 2$, si ha $\dim(U + W)^{\perp} = 1$.

2) Un vettore non nullo di $(U + W)^{\perp}$ è $(3, 0, -1)$.

Esercizio A.7.3 Sia T l'operatore di \mathbb{R}^3 definito da

$$T(e_1) = e_2, \quad T(e_2) = e_2, \quad T(e_3) = 0.$$

(e_1, e_2, e_3) è la base canonica di \mathbb{R}^3) e sia $S = 3id_{\mathbb{R}^3}$.

Trovare le matrici $M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(T \circ S)$ e $M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(S \circ T)$.

Soluzione. Poiché $T \circ S = S \circ T = 3T$, si ha:

$$M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(T \circ S) = M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(S \circ T) = M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}(3T) = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Esercizio A.7.4 Siano $P = (1, 3, -2)$, $Q = (1, -1, -2)$.

- 1) Scrivere equazioni parametriche della retta passante per P e Q .
- 2) Scrivere un'equazione cartesiana di un piano passante per Q e ortogonale alla retta PQ .
- 3) Scrivere un'equazione cartesiana di un piano passante per i punti P , Q e per l'origine $O = (0, 0, 0)$.

Soluzione. 1) Equazioni parametriche della retta passante per $P = (1, 3, -2)$ e $Q = (1, -1, -2)$ sono

$$r : \begin{cases} x = 1 \\ y = 3 + t \\ z = -2 \end{cases}$$

- 2) Un'equazione cartesiana di un piano passante per Q e ortogonale alla retta PQ è $y + 1 = 0$.
- 3) Un'equazione cartesiana di un piano passante per i punti P , Q e per $(0, 0, 0)$ è $2x + z = 0$.

Esercizio A.7.5 Si considerino i tre piani:

$$2x + y - z = 0, \quad -2x + 5y - 2z = 3, \quad 4y + hz = 1.$$

Trovare i valori di h per i quali l'intersezione dei tre piani è un punto.

Soluzione. L'intersezione dei tre piani è l'insieme delle soluzioni del sistema

$$\begin{cases} 2x + y - z = 0 \\ -2x + 5y - 2z = 3 \\ 4y + hz = 1 \end{cases}$$

La matrice completa del sistema è

$$\begin{vmatrix} 2 & 1 & -1 & 0 \\ -2 & 5 & -2 & 3 \\ 0 & 4 & h & 1 \end{vmatrix}$$

Riducendo a scala, si ottiene, ad esempio, la matrice

$$A' = \begin{vmatrix} 2 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 6 & -3 & 3 \\ 0 & 0 & 2+h & -1 \end{vmatrix}$$

Da questa matrice leggiamo che l'intersezione dei tre piani è un punto per ogni $h \neq -2$.