

# Geometria 1

Davide Peccioli

Anno accademico 2021-2022

Università degli studi di Torino



# Indice

<b>1</b>	<b>Matrici</b>	<b>5</b>
1.1	Somma . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Gruppo</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Operazioni con le matrici</b>	<b>9</b>
3.1	Moltiplicazione . . . . .	9
3.2	Prodotto tra matrici . . . . .	10
3.2.1	Prodotto tra matrici quadrate . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Operazioni tra sottospazi vettoriali</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Funzioni lineari</b>	<b>21</b>
5.1	Matrice associata ad una applicazione lineare . . . . .	23
5.2	Immagine di sottospazi vettoriali . . . . .	25
5.3	Retroimmagine di sottospazi . . . . .	28
5.4	Nucleo di una funzione lineare . . . . .	30
5.5	Proprietà delle funzioni lineari . . . . .	35
5.6	Funzioni lineari e cambiamenti di base . . . . .	38
5.6.1	Caso particolare . . . . .	39
5.7	Spazio delle funzioni lineari . . . . .	42
5.7.1	Somma di funzioni lineari . . . . .	42
5.7.2	Prodotto per scalari di funzioni lineari . . . . .	42
5.8	Composizione di funzioni lineari . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Spazi vettoriali Euclidei</b>	<b>46</b>



# 1 Matrici

Una matrice è una tabella rettangolare di numeri reali ( $\in \mathbb{R}$ )

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{contiene } m \cdot n \text{ numeri} \\ \text{contiene } m \text{ righe} \\ \text{contiene } n \text{ colonne} \end{array}$$

$a_{ij}$  è l'elemento della matrice nella  $i$ -esima riga e nella  $j$ -esima colonna.  
 $a_{ij} \in \mathbb{R}$ .

$A$  è una matrice  $m \cdot n$ . Se  $m = n$  allora  $A$  è una **matrice quadrata**.

Le matrici servono per:

- risolvere sistemi lineari
- studiare spazi vettoriali
- classificare strutture geometriche (es. coniche)
- presentare funzioni (semplificandone lo studio)

$\mathbb{R}^{m,n}$  è l'insieme delle matrici  $m \cdot n$ :

- $\mathbb{Q}^{m,n}$  è l'insieme delle matrici  $m \cdot n$  le cui entrate sono elementi di  $\mathbb{Q}$ .

## Esempi (1.1)

- $\mathbb{R}^{2,2}$ : matrici  $2 \cdot 2$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ -1 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdots \in \mathbb{R}^{2,2}$$

- $\mathbb{R}^{1,1} = \mathbb{R}$

- $\mathbb{R}^{m,1}$ :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m,1} \quad \text{anche } \mathbf{vettori\ colonna}$$

- $\mathbb{R}^{1,n}$ :

$$A = (a_{11} \quad a_{12} \quad \cdots \quad a_{1n}) \in \mathbb{R}^{1,n} \quad \text{anche } \mathbf{vettori\ riga}$$

In  $\mathbb{R}^{m,n}$  è sempre definita la **matrice nulla**, in cui tutte le entrate sono nulle. In  $\mathbb{R}^{n,n}$  è sempre definita la **matrice identità**:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- In  $\mathbb{R}^{1,1}$ ,  $I = 1$

- In  $\mathbb{R}^{2,2}$

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- In  $\mathbb{R}^{3,3}$

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La diagonale composta unicamente da 1 nella matrice identità è il **diagonale principale** della matrice.

## 1.1 Somma

Siano  $A, B \in \mathbb{R}^{m,n}$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix}$$

$$A + B = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} & \cdots & a_{1n} + b_{1n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{m1} + b_{m1} & \dots\dots\dots & a_{mn} + b_{mn} \end{pmatrix}$$

### Esempi (1.2)

- In  $\mathbb{R}^{1,1}$  la somma tra matrici coincide con la somma usuale di numeri reali.
- $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -2 & 1 \\ 3 & -1 & 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 4 \\ 3 & -2 & 8 \end{pmatrix}$

### Proprietà della somma

(i) La somma è **associativa**:

$$\forall A, B, C \in \mathbb{R}^{m,n} \quad (A + B) + C = A + (B + C)$$

e posso scrivere  $A + B + C$  senza ambiguità.

(ii) La somma è **commutativa** (o abeliana):

$$\forall A, B \in \mathbb{R}^{m,n} \quad A + B = B + A$$

(iii) Se  $A \in \mathbb{R}^{m,n}$  e  $B \in \mathbb{R}^{m,n}$  è la matrice nulla ( $B = \underline{0}$ ), allora  $A + B = B + A = A$

(iv)  $A - A = \underline{0}$ :

$$\forall A \in \mathbb{R}^{m,n} \exists -A \in \mathbb{R}^{m,n} \text{ t.c. } A - A = \underline{0}$$

**Definizione** Data  $A \in \mathbb{R}^{m,n}$ ,

$$\text{con } A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

si definisce  $-A$ ,

$$\text{con } -A = \begin{pmatrix} -a_{11} & \cdots & -a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{m1} & \cdots & -a_{mn} \end{pmatrix}$$

**Notazione** In genere si scrive  $A - B$  in luogo di  $A + (-B)$ , e si considera come una sottrazione di matrici

**Definizione** Due matrici  $A, B \in \mathbb{R}^{m,n}$  sono uguali se hanno le stesse entrate ( $A = B$ )

**Proprietà**  $A = B \iff B - A = 0$

## 2 Gruppo

**Definizione** Siano  $A, B$  due insiemi, si definisce **prodotto cartesiano**:

$$A \times B = \{(a, b) \text{ t.c. } a \in A, b \in B\}$$

in cui conta l'ordine:  $(a, b) \neq (b, a)$

$$A \times A = \{(a_1, a_2) \text{ t.c. } a_1, a_2 \in A\}$$

**Definizione** Sia  $G$  un insieme. Una **operazione** in  $G$  è una funzione

$$\begin{aligned} \star : G \times G &\rightarrow G \\ (g, h) &\mapsto g \star h \end{aligned}$$

**Proprietà**

(i) L'operazione è **associativa** se  $(g \star h) \star k = g \star (h \star k)$

(ii) L'operazione ha un **elemento neutro** se

$$\exists e \in G \text{ t.c. } g \star e = e \star g = g, \forall g \in G$$

(iii) Se  $g \in G$  chiamiamo **inverso di  $g$**  un elemento

$$k \in G \text{ t.c. } g \star k = k \star g = e$$



**Definizione** Un **gruppo** è un insieme  $G$  con un'operazione  $\star$  t.c.

1.  $\star$  è associativa
2. esiste un elemento neutro
3. ogni elemento ha un inverso

**Esempi (2.1)** Sono gruppi

$$(\mathbb{R}, +), (\mathbb{Z}, +), (\mathbb{Q}, +),$$

~~$(\mathbb{R}, \cdot)$~~ : lo zero non ha un inverso,

$$(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot), (\mathbb{R}^{m,n}, +)$$

**Definizione** Un gruppo  $(G, \star)$  è **abeliano** se

$$g \star h = h \star g \quad \forall g, h \in G$$

Nel caso di un gruppo abeliano l'operazione è indicata con  $+$  e l'elemento neutro con  $0$ .

$(\mathbb{R}^{m,n}, +)$  è un gruppo abeliano

21 set 2021

## 3 Operazioni con le matrici

### 3.1 Moltiplicazione

Si può moltiplicare  $\lambda \in \mathbb{R}$  con matrici  $A \in \mathbb{R}^{m,n}$

$$\lambda A = \lambda \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda a_{11} & \cdots & \lambda a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda a_{m1} & \cdots & \lambda a_{mn} \end{pmatrix}$$

$$-1 \cdot A = -A \quad \text{coerente con la definizione di } -A$$

**Esempio (3.1)**

$$2 \begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ -1 & 4 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & 2 & 0 \\ -2 & 8 & 2 \end{pmatrix}$$

**Osservazione (3.1)**  $0 \cdot A$  è la matrice nulla  $\forall A \in \mathbb{R}^{m,n}$

### Proprietà del prodotto per scalari

- (i)  $\lambda(A + B) = \lambda A + \lambda B \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}, A, B \in \mathbb{R}^{m,n}$
- (ii)  $(\lambda + \mu) \cdot A = \lambda \cdot A + \mu \cdot A \quad \forall \lambda, \mu \in \mathbb{R}, A \in \mathbb{R}^{m,n}$
- (iii)  $(\lambda\mu)A = \lambda(\mu A) \quad \forall \lambda, \mu \in \mathbb{R}, A \in \mathbb{R}^{m,n}$
- (iv)  $1 \cdot A = A \quad \forall A \in \mathbb{R}^{m,n}$

$(\mathbb{R}^{m,n}, +)$  è un **gruppo abeliano** in cui è definita una moltiplicazione per scalari in cui valgono le proprietà *i-iv* (prototipo per gli spazi vettoriali).

### 3.2 Prodotto tra matrici

$$A, B \text{ t.c. } A \in \mathbb{R}^{m,n}, B \in \mathbb{R}^{n,k} \implies AB \in \mathbb{R}^{m,k}$$

Questo è definito come il prodotto **righe per colonne**. Il numero di colonne della prima matrice deve corrispondere con il numero di righe della seconda matrice.

**Definizione** Siano  $A \in \mathbb{R}^{m,n}$  e  $B \in \mathbb{R}^{n,k}$  due matrici, siano  $a_{ij}$  gli elementi di  $A$  e  $b_{rs}$  gli elementi di  $B$  [Notazione:  $A = (a_{ij})$ ,  $B = (b_{rs})$ ]

La matrice  $A \cdot B$  è la matrice in  $\mathbb{R}^{m,k}$  il cui  $ij$ -esimo elemento è

$$a_{i1} \cdot b_{1j} + a_{i2} \cdot b_{2j} + \cdots + a_{in} \cdot b_{nj} = \sum_{r=1}^n a_{ir} \cdot b_{rj}$$

#### 3.2.1 Prodotto tra matrici quadrate

Siano  $A, B \in \mathbb{R}^{m,m}$ ,  $AB \in \mathbb{R}^{m,m}$ ; in questo caso il prodotto tra matrici definisce una operazione in  $\mathbb{R}^{m,m}$ .

- i. il prodotto è associativo:  $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$ ,  $\forall A, B, C \in \mathbb{R}^{m,m}$
- ii. esiste un elemento neutro

**Proposizione p.i** Sia  $I \in \mathbb{R}^{m,m}$  la matrice identità,  $A \in \mathbb{R}^{m,m}$

$$\implies A \cdot I = I \cdot A = A \quad \forall A \in \mathbb{R}^{m,m}$$

**dim. (p.i)** Sia  $(r_{ij})$  l' $ij$ -esimo elemento della matrice  $A \cdot I$  con  $A = (a_{ij})$  e  $I = (b_{ij})$

$$r_{ij} = \sum_{n=1}^m a_{in} \cdot b_{ni}$$

Si noti che  $b_{kh} = 0 \ \forall k, h | k \neq h \implies$

$$\begin{aligned} r_{ij} &= \sum_{n=1}^m a_{in} \cdot b_{nj} = \\ &= \cancel{a_{i1}b_{1j}} + \cancel{\dots} + a_{ij}b_{jj} + \cancel{\dots} + \cancel{a_{im}b_{mj}} = \\ &= a_{ij} \cdot b_{jj} = a_{ij} \cdot 1 \end{aligned}$$

$$\implies r_{ij} = a_{ij} \quad \square$$

In generale se  $A \in \mathbb{R}^{m,m} \nexists$  un inverso per  $A$ , cioè non esiste  $B \in \mathbb{R}^{m,m}$  tale che  $A \cdot B = B \cdot A = I$

### Esempio (3.2)

- Se  $A$  è la matrice nulla  
 $\implies A \cdot B = \text{matrice nulla} \neq I$
- Se  $A$  ha una riga o una colonna nulla (ovvero fatta tutta di zeri)  
 $\implies$  non è invertibile

5 ott 2021

**Teorema I** Sia  $V$  uno spazio vettoriale su campo  $\mathbb{K}$ , e  $W \subseteq V$  un sottospazio vettoriale:

1. se  $V$  è finitamente generato  $\implies W$  è finitamente generato;
2. se  $V$  è finitamente generato  $\implies \dim W \leq \dim V$
3. se  $V$  è finitamente generato e  $\dim W = \dim V \implies W = V$

### dim. (I)

1. Supponiamo che  $V$  sia finitamente generato, e per assurdo che  $W$  non lo sia.

$V$  è finitamente generato  $\implies V$  ha una base

$$\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$$

$W$  non è finitamente generato, e sia  $w_1 \in W$ ,  $w_1 \neq \underline{0}$ , considero  $\mathcal{L}(w_1) \subseteq W$ , ma  $W \neq \mathcal{L}(w_1)$ , altrimenti  $W$  sarebbe generato da  $w_1$ .  
 $\implies \exists w_2 \in W \wedge w_2 \notin \mathcal{L}(w_1)$ .

Considero  $\mathcal{L}(w_1, w_2) \subseteq W$ , ma  $W \neq \mathcal{L}(w_1, w_2)$ , altrimenti  $W$  sarebbe generato da  $\{w_1, w_2\}$ .  $\implies$   
 $\implies \exists w_3 \in W \wedge w_3 \notin \mathcal{L}(w_1, w_2)$ .

Itero il procedimento e trovo

$$\begin{aligned} \{w_1, \dots, w_{n+1}\} \subseteq W \text{ t.c. } w_{n+1} \notin \mathcal{L}(w_1, \dots, w_n) &\implies \\ \implies \{w_1, \dots, w_{n+1}\} \text{ è un insieme libero} \end{aligned}$$

e contiene più elementi di una base  $\mathcal{B}$ . Assurdo per teorema precedente.

2. Supponiamo  $V$  finitamente generato, e sia  $W \subseteq V$  un sottospazio vettoriale.  $W$  è finitamente generato (per 1.)  $\implies \exists \mathcal{B} = \{w_1, \dots, w_m\}$  base di  $W \implies \mathcal{B} \subseteq V$  è un sottoinsieme libero  $\implies m \leq \dim V \implies \dim W \leq \dim V$
3. Sia  $W \subseteq V$  uno spazio vettoriale, con  $V$  finitamente generato.  $\dim W = \dim V$ .

$W$  ha una base  $\mathcal{B}$  con  $n$  vettori, dove  $n = \dim V \implies \mathcal{B}$  è una base di  $V$ .

Se  $\mathcal{B} = \{w_1, \dots, w_n\} \implies W = \mathcal{L}(w_1, \dots, w_n) = V \implies W = V$   $\square$

**Osservazione (3.2)** Se  $V$  è uno spazio vettoriale finitamente generato, e  $\dim V = n \implies$  ogni insieme libero con  $n$  elementi è una base. Infatti se  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$  è un insieme libero, se per assurdo esistesse  $v \in V \wedge v \notin \mathcal{L}(v_1, \dots, v_n) \implies \{v_1, \dots, v_n, v\} \subseteq V$  è un insieme libero di cardinalità  $n + 1$  (ovvero con  $n + 1$  elementi). Assurdo.

**Teorema II (del completamento di una base)** Sia  $V$  uno spazio vettoriale su un campo  $\mathbb{K}$  finitamente generato. Sia  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$  una base di  $V$  e sia  $I = \{a_1, \dots, a_l\} \subseteq V$  un sottoinsieme libero. Esiste sempre  $\mathcal{B}'$  base di  $V$  i cui primi  $l$ -elementi sono  $a_1, \dots, a_l$  e i restanti  $n - l$ -elementi sono elementi di  $\mathcal{B}$ .

$$\mathcal{B}' = \{a_1, \dots, a_l, w_1, \dots, w_{n-l}\} \text{ con } w_1, \dots, w_{n-l} \in \mathcal{B}$$

**dim. (II)** Applico il metodo degli scarti successivi

$l = n$  l'enunciato è banale ( $I$  è già una base e non va completata);

$l < n \implies \mathcal{L}(a_1, \dots, a_l) \subsetneq V$   
 $\implies \exists w_1 \in \mathcal{B}$  t.c.  $w_1 \notin \mathcal{L}(a_1, \dots, a_l)$ . Infatti, se tutti i generatori appartenenti a  $\mathcal{B}$  fossero combinazioni lineari di  $a_1, \dots, a_l$ , non sarebbero più tutti linearmente indipendenti.  $\implies I_1 = \{a_1, \dots, a_l, w_1\}$  è libero.

Se  $I_1$  è una base, la dimostrazione si conclude, altrimenti  $\exists w_2 \in \mathcal{B}$  t.c.  $w_2 \notin \mathcal{L}(a_1, \dots, a_l, w_1)$   
 $\implies I_1 = \{a_1, \dots, a_l, w_1, w_2\}$  è libero.

Se  $I_2$  è una base la dimostrazione si conclude, altrimenti si itera fino a

$$I_{n-l} = \{a_1, \dots, a_l, w_1, \dots, w_{n-l}\} \text{ con } w_1, \dots, w_{n-l} \in \mathcal{B}.$$

$I_{n-l}$  è libero con  $n$  vettori  $\implies I_{n-l}$  è una base  $\square$

**Esempio (3.3)**  $\mathcal{S}(\mathbb{R}^{3,3}) = \{A \in \mathbb{R}^{3,3} \text{ t.c. } {}^tA = A\}$

Cerco una base. Sia  $A \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^{3,3})$  generica:

$$A = \begin{pmatrix} a & b & c \\ b & d & e \\ c & e & f \end{pmatrix} \text{ con } a, b, c, d, e, f \in \mathbb{R}$$

$$\begin{aligned} A = a \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \\ + c \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} + d \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \\ + e \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} + f \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Siano } E_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, E_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, E_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, E_4 = \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, E_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, E_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ e sia } \mathcal{B} = \{E_1, \dots, E_6\} \end{aligned}$$

Dato

$$I = \left\{ A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \right. \\ \left. A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \right. \\ \left. A_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right\} \subseteq \mathcal{S}(\mathbb{R}^{3,3})$$

insieme libero, si trovino tre elementi  $w_1, w_2, w_3 \in \mathcal{B}$  tali per cui  $I \cup \{w_1, w_2, w_3\}$  sia una base di  $\mathcal{S}(\mathbb{R}^{3,3})$ .

$$A_1 = E_1 + 2E_2; A_2 = E_1 - E_4 + E_6; A_3 = E_2 - E_3$$

e rispetto alla base  $\mathcal{B}$

$$A_1 = (1, 2, 0, 0, 0, 0), A_2 = (1, 0, 0, -1, 0, 1), A_3 = (0, 1, -1, 0, 0, 0) \\ E_1 = (1, 0, \dots, 0), E_2 = (0, 1, 0, \dots, 0), \dots, E_6 = (0, \dots, 0, 1)$$

Si studia l'appartenenza di  $E_1 \in \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3)$ . Studio il sistema

$$E_1 = \lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \lambda_3 A_3$$

$$\begin{cases} 1 = \lambda_1 + \lambda_2 \\ 0 = 2\lambda_1 + \lambda_3 \\ 0 = -\lambda_3 \\ 0 = -\lambda_2 \\ 0 = 0 \\ 0 = \lambda_2 \end{cases} \implies \begin{cases} \lambda_2 = 0 \\ \lambda_3 = 0 \\ \lambda_1 = 0 \\ \lambda_1 = 1 \end{cases} \implies \text{Il sistema non ha soluzione}$$

$$\implies E_1 \notin \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3) \implies I_2 = \{A_1, A_2, A_3, E_1\}$$

Si studia l'appartenenza di  $E_2 \in \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3, E_1)$ . Studio il sistema

$$E_2 = \lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \lambda_3 A_3 + \lambda_4 E_1$$

$$\begin{cases} 0 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 \\ 1 = 2\lambda_1 + \lambda_3 \\ 0 = -\lambda_3 \\ 0 = -\lambda_2 \\ 0 = 0 \\ 0 = \lambda_2 \end{cases} \implies \begin{cases} \lambda_4 = -\frac{1}{2} \\ \lambda_3 = 0 \\ \lambda_2 = 0 \\ \lambda_1 = \frac{1}{2} \end{cases} \implies \text{Il sistema ha soluzione}$$

$$\implies E_2 \in \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3, E_1) \implies \text{scarto } E_2$$

Si studia l'appartenenza di  $E_3 \in \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3, E_1)$ . Studio il sistema

$$E_3 = \lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \lambda_3 A_3 + \lambda_4 E_1$$

$$\begin{cases} 0 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 \\ 0 = 2\lambda_1 + \lambda_3 \\ 1 = -\lambda_3 \\ 0 = -\lambda_2 \\ 0 = 0 \\ 0 = \lambda_2 \end{cases} \implies \begin{cases} \lambda_4 = -\frac{1}{2} \\ \lambda_3 = -1 \\ \lambda_2 = 0 \\ \lambda_1 = \frac{1}{2} \end{cases} \implies \text{Il sistema ha soluzione}$$

$$\implies E_3 \in \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3, E_1) \implies \text{scarto } E_3$$

Si studia l'appartenenza di  $E_4 \in \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3, E_1)$ . Studio il sistema

$$E_4 = \lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \lambda_3 A_3 + \lambda_4 E_1$$

$$\begin{cases} 0 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 \\ 0 = 2\lambda_1 + \lambda_3 \\ 0 = -\lambda_3 \\ 1 = -\lambda_2 \\ 0 = 0 \\ 0 = \lambda_2 \end{cases} \implies \begin{cases} \lambda_2 = 0 \\ \lambda_2 = -1 \\ \dots \end{cases} \implies \text{Il sistema non ha soluzione}$$

$$\implies E_4 \notin \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3, E_1) \implies I_2 = \{A_1, A_2, A_3, E_1, E_4\}$$

Si studia l'appartenenza di  $E_5 \in \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3, E_1, E_4)$ . Studio il sistema

$$E_5 = \lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \lambda_3 A_3 + \lambda_4 E_1 + \lambda_5 E_4$$

$$\begin{cases} 0 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 \\ 0 = 2\lambda_1 + \lambda_3 \\ 0 = -\lambda_3 \\ 0 = -\lambda_2 + \lambda_5 \\ 1 = 0 \\ 0 = \lambda_2 \end{cases} \implies \begin{cases} 1 = 0 \\ \dots \end{cases} \implies \text{Il sistema non ha soluzione}$$

$$\implies E_5 \in \mathcal{L}(A_1, A_2, A_3, E_1, E_4) \implies I_3 = \{A_1, A_2, A_3, E_1, E_4, E_5\}$$

La soluzione è  $\mathcal{B}' = \{A_1, A_2, A_3, E_1, E_4, E_5\}$

## 4 Operazioni tra sottospazi vettoriali

Sia  $V$  uno spazio vettoriale su un campo  $\mathbb{K}$ , e siano  $W_1$  e  $W_2 \subseteq V$  due sottospazi vettoriali.

Si consideri

$$W_1 \cap W_2 = \{x \mid x \in w_1 \wedge x \in w_2\}$$

**Proposizione p.ii**  $W_1 \cap W_2$  è sempre sottospazio vettoriale

*dim.* (p.ii) Siano  $x, y \in W_1 \cap W_2$

$$\implies \left\{ \begin{array}{l} x, y \in W_1 \implies (x+y) \in W_1 \\ x, y \in W_2 \implies (x+y) \in W_2 \end{array} \right\} \implies (x+y) \in W_1 \cap W_2$$

7 ott 2021

**Proposizione p.iii** Sia  $V$  uno spazio vettoriale e  $W, W_1$  e  $W_2$  sottospazi di  $V$ .

Se  $W$  contiene  $W_1$  e  $W$  contiene  $W_2$  allora  $W$  contiene  $W_1 + W_2$  (cioè  $W_1 + W_2$  è il più piccolo sottospazio di  $V$  che contiene sia  $W_1$  che  $W_2$ )

*dim.* (p.iii) Sia  $x + y \in W_1 + W_2$ ,  $x \in W_1 \implies x \in W, y \in W_2 \implies y \in W \implies x + y \in W$ , poiché  $W$  è un sottospazio vettoriale. Quindi ogni  $v \in W_1 + W_2$  è elemento di  $W \implies W_1 + W_2 \subseteq W$ .

La somma si generalizza a più sottospazi. Siano  $W_1, \dots, W_l \subseteq V$  sottospazi vettoriali, allora si definisce

$$W_1 + \dots + W_l = \{x_1 + \dots + x_l \mid x_1 \in W_1, \dots, x_l \in W_l\} \subseteq V$$



è un sottospazio vettoriale ed è il più piccolo sottospazio che contiene tutti i  $W_1, \dots, W_l$   $\square$

**Esercizio** Si trovino somma e intersezione dei seguenti sottospazi vettoriali di  $\mathbb{R}^4$

- a.  $W_1 = \{(x_1, x_2, 0, 0) | x_1, x_2 \in \mathbb{R}\}$ ,  $W_2 = L(e_4)$
- b.  $W_1 = \{(x_1, x_2, 0, 0) | x_1, x_2 \in \mathbb{R}\}$ ,  
 $Z_2 = \{(0, x_2, 0, x_4) | x_2, x_4 \in \mathbb{R}\}$

**Soluzione**

- a.  $W_1 + W_2 = \{(x_1, x_2, 0, x_4) | x_1, x_2, x_4 \in \mathbb{R}\}$ ,  $W_1 \cap W_2 = \{\underline{0}\}$
- b.  $W_1 + Z_2 = \{(x_1, x_2, 0, x_4) | x_1, x_2, x_4 \in \mathbb{R}\}$ ,  
 $W_1 \cap Z_2 = \{(0, x_2, 0, 0) | x_2 \in \mathbb{R}\}$

**Proposizione p.iv** Sia  $V$  spazio vettoriale su un campo  $\mathbb{K}$  e  $W_1, W_2 \subseteq V$  due sottospazi. Sono fatti equivalenti le seguenti proposizioni:

- 1.  $W_1 \cap W_2 = \{\underline{0}\}$  (hanno intersezione banale)
- 2. ogni  $v \in W_1 + W_2$  si scrive in modo unico come  $v = x + y$  con  $x \in W_1$  e  $y \in W_2$

*dim.* (p.iv)

- 1.  $\implies$  2. Suppongo  $W_1 \cap W_2 = \{\underline{0}\}$  e considero  $v \in W_1 + W_2$ . Scrivo  $v = x_1 + y_1$ ,  $v = x_2 + y_2$  e dimostro che  $x_1 = x_2$  e  $y_1 = y_2$

$\underline{0} = v - v = (x_1 + y_1) - (x_2 + y_2) = (x_1 - x_2) + (y_1 - y_2) \implies x_1 - x_2 = y_2 - y_1$ ,  $x_1 - x_2 \in W_1$  mentre  $y_2 - y_1 \in W_2$ . Per l'uguaglianza risulta che

$$\begin{cases} x_1 - x_2 \in W_2 \implies x_1 - x_2 \in W_1 \cap W_2 \\ y_2 - y_1 \in W_1 \implies y_2 - y_1 \in W_1 \cap W_2 \end{cases}$$

$$\implies \begin{cases} x_1 - x_2 = \underline{0} \implies x_1 = x_2 \\ y_2 - y_1 = \underline{0} \implies y_1 = y_2 \end{cases}$$

- 2.  $\implies$  1. Suppongo che ogni  $v \in W_1 + W_2$  si scriva in modo unico come  $v = x + y$  con  $x \in W_1$  e  $y \in W_2$  e dimostro che  $W_1 \cap W_2 = \{\underline{0}\}$

Sia  $v \in W_1 \cap W_2$ . Sia  $v \in W_1 + W_2$ ,  $v = x + y = x + v + y - v$ , con  $x + v \in W_1$ ,  $y - v \in W_2$ . Quindi se  $v \neq \underline{0}$ , le due scritture  $v = x + y$ ,  $v = (x + v) + (y - v)$  sono diverse e ciò non è possibile per ipotesi

□

**Notazione** Se  $W_1 \cap W_2 = \{\underline{0}\}$  si scrive  $W_1 \oplus W_2$  invece che  $W_1 + W_2 \oplus$  si legge “somma diretta”

**Esempio (4.1)**  $\mathbb{K}^{n,n} = S(\mathbb{K}^{n,n}) \oplus A(\mathbb{K}^{n,n})$

**Esempio (4.2)**  $R^2 = \mathcal{L}(e_1) \oplus \mathcal{L}(e_2)$

**Proposizione p.v** Sia  $V$  uno spazio vettoriale su un campo  $\mathbb{K}$ . Siano  $W_1, \dots, W_l \subseteq V$  sottospazi vettoriali. Sono fatti equivalenti le seguenti proposizioni

1.  $W_i \cap (W_1 + \dots + W_{i-1} + W_{i+1} + \dots + W_l) = \{\underline{0}\} \forall i = 1, \dots, l$
2. Ogni  $v \in W_1 + \dots + W_l$  si scrive in modo unico come  $v = x_1 + \dots + x_l$  con  $x_1 \in W_1, \dots, x_l \in W_l$

Se vale 1. si scrive  $W_1 \oplus W_2 \oplus \dots \oplus W_l$

**Esempio (4.3)** Considero  $V$  spazio vettoriale di dimensione finita e  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\} \implies V = \mathcal{L}(v_1) \oplus \dots \oplus \mathcal{L}(v_l)$

Sia  $V$  spazio vettoriale su un campo  $\mathbb{K}$ , finitamente generato. Sia  $W \subseteq V$  un sottospazio vettoriale, sia  $\mathcal{B} = \{w_1, \dots, w_l\}$  una base di  $W$ . Possiamo completare  $\mathcal{B}$  con una base dello spazio  $\mathcal{B}' = \{w_1, \dots, w_l, v_1, \dots, v_m\}$ . Sia

$$Z = \mathcal{L}(v_1, \dots, v_m) \subseteq V$$

un sottospazio vettoriale, e per costruzione  $V = W \oplus Z$

**Osservazione (4.1)** Sia  $V$  spazio vettoriale di dimensione finita con  $V = W \oplus Z$  Siano  $\mathcal{B} = \{w_1, \dots, w_l\}$  una base di  $W$  e  $\mathcal{C} = \{z_1, \dots, z_m\}$  una base di  $Z$ . Ogni elemento di  $V$  si scrive in modo unico come  $v = x + y$  con  $x \in W$  e  $y \in Z$   $\mathcal{B}$  base di  $W$

$\implies x$  si scrive in modo unico come  $x = \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_l w_l$

$\mathcal{C}$  base di  $Z \implies y$  si scrive in modo unico come

$$y = \mu_1 z_1 + \dots + \mu_m z_m$$

$\implies v$  si scrive in modo unico come

$$v = \lambda_1 w_1 + \cdots + \lambda_l w_l + \mu_1 z_1 + \cdots + \mu_n z_n$$

$\implies B \cup C = \{w_1, \dots, w_l, z_1, \dots, z_l\}$  è una base di  $V$

$\implies \dim V = \dim W + \dim Z$

**Teorema III** Sia  $V$  uno spazio vettoriale su un campo  $\mathbb{K}$  finitamente generato. Siano  $W_1, W_2 \subseteq V$  due sottospazi vettoriali t. c.  $V = W_1 + W_2$ . Allora

$$\dim V = \dim W_1 + \dim W_2 - \dim(W_1 \cap W_2)$$

Questa è la **Formula di Grassmann**.

*dim.* (III) Chiamo

$$\dim V = n, \dim W_1 = l, \dim W_2 = p, \dim(W_1 \cap W_2) = r$$

In particolare  $l, p \leq n, r \leq l, p$

1.  $r = l \implies W_1 \cap W_2 = W_1 \implies W_1 \subseteq W_2 \implies W_1 + W_2 = W_2 = V$
2.  $r = p \implies W_1 \cap W_2 = W_2 \implies W_2 \subseteq W_1 \implies W_1 + W_2 = W_1 = V$
3. si assume  $r \leq l, p$  e sia

$$\mathcal{B} = \{a_1, \dots, a_r\} \text{ base di } W_1 \cap W_2$$

Completo  $\mathcal{B}$  con una base  $\mathcal{C}$  di  $W_1$ ,

$$\mathcal{C} = \{a_1, \dots, a_r, b_{r+1}, \dots, b_l\}$$

e completo  $\mathcal{B}$  con una base  $\mathcal{D}$  di  $W_2$ ,

$$\mathcal{D} = \{a_1, \dots, a_r, c_{r+1}, \dots, c_p\}$$

Si verifica che l'insieme

$$\{a_1, \dots, a_r, b_{r+1}, \dots, b_l, c_{r+1}, \dots, c_p\}$$

è una base di  $V$ . In questo modo si ottiene

$$\dim V = l + (p - r)$$

cioè la tesi.

Ovviamente risulta

$$\mathcal{L}(a_1, \dots, a_r, b_{r+1}, \dots, b_l, c_{r+1}, \dots, c_p) = V$$

in quanto contiene i generatori sia di  $W_1$  che di  $W_2$ , e quindi anche della loro somma. Verifichiamo che l'insieme

$$\{a_1, \dots, a_r, b_{r+1}, \dots, b_l, c_{r+1}, \dots, c_p\}$$

sia libero. Supponiamo

$$\begin{aligned} \lambda_1 a_1 + \dots + \lambda_r a_r + \mu_{r+1} b_{r+1} + \dots + \mu_l b_l + \gamma_{r+1} c_{r+1} + \dots + \gamma_p c_p &= \underline{0} ** \\ (\lambda_1 a_1 + \dots + \lambda_r a_r + \mu_{r+1} b_{r+1} + \dots + \mu_l b_l) &= (-\gamma_{r+1} c_{r+1} - \dots - \gamma_p c_p) \end{aligned}$$

Sia

$$\begin{aligned} c &= (-\gamma_{r+1} c_{r+1} - \dots - \gamma_p c_p) = \\ &= (\lambda_1 a_1 + \dots + \lambda_r a_r + \mu_{r+1} b_{r+1} + \dots + \mu_l b_l) \end{aligned}$$

sicuramente  $c \in W_2$

$$\lambda_1 a_1 + \dots + \lambda_r a_r + \mu_{r+1} b_{r+1} + \dots + \mu_l b_l \in W_1$$

$$\implies c \in W_1 \cap W_2 = \mathcal{L}(a_1, \dots, a_r)$$

$$\implies c = \beta_1 a_1 + \dots + \beta_r a_r, \text{ vado a sostituire in } **$$

$$\begin{aligned} (\beta_1 a_1 + \dots + \beta_r a_r) + (\gamma_{r+1} c_{r+1} + \dots + \gamma_p c_p) &= \underline{0} \\ \implies \begin{cases} \beta_1 = \dots = \beta_r = 0 \\ \gamma_{r+1} = \dots = \gamma_p = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Ho ottenuto

$$\begin{aligned} \gamma_{r+1} = \dots = \gamma_p &= 0 \\ \lambda_1 a_1 + \dots + \lambda_r a_r + \mu_{r+1} b_{r+1} + \dots + \mu_l b_l &= \underline{0} \end{aligned}$$

Poiché l'insieme

$$\mathcal{C} = \{a_1, \dots, a_r, b_{r+1}, \dots, b_l\}$$

è libero

$$\implies \lambda_1 = \dots = \lambda_r = \mu_{r+1} = \dots = \mu_l = 0$$

$$\implies \{a_1, \dots, a_r, b_{r+1}, \dots, b_l, c_{r+1}, \dots, c_p\} \text{ è libero}$$

□

2 nov 2021

## 5 Funzioni lineari

$V$  e  $W$  spazi vettoriali sullo stesso campo  $\mathbb{K}$  e una funzione  $F : V \rightarrow W$ ,  $F$  è lineare se verifica  $F(\lambda v + \mu w) = \lambda F(v) + \mu F(w) \forall \lambda, \mu \in \mathbb{K}, v, w \in V$

**Teorema IV (di esistenza e unicità)** Siano  $V$  e  $W$  spazi vettoriali su un campo  $\mathbb{K}$  con  $V$  finitamente generato.

Sia  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$  una base di  $V$  e  $a_1, \dots, a_n \in W$ .

Allora esiste un'unica funzione lineare  $F : V \rightarrow W$  tale che  $F(v_i) = a_i \forall i = 1, \dots, n$

*dim.* (IV)

Esistenza Sia  $v \in V$ ,  $v$  si scrive in modo unico come  $v = x_1 v_1 + x_2 v_2 + \dots + x_n v_n$  per  $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{K}$

Si definisce

$$F(v) = F(x_1 v_1 + x_2 v_2 + \dots + x_n v_n) := x_1 a_1 + \dots + x_n a_n$$

$F$  definisce una funzione  $V \rightarrow W$  tale che  $F(v_i) = a_i$  per  $i = 1, \dots, n$ . Verifico che  $F$  è lineare.

Siano  $\lambda, \mu \in \mathbb{K}$  e  $v, w \in V$  e dimostro che  $F(\lambda v + \mu w) = \lambda F(v) + \mu F(w)$

Scrivo

$$v = \sum_{k=1}^n x_k v_k$$

e

$$w = \sum_{r=1}^n y_r v_r$$

$$\lambda v + \mu w = \sum_{k=1}^n (\lambda x_k + \mu y_k) v_k$$

Quindi per come è definita  $F$  risulta che

$$\begin{aligned}
 F(\lambda v + \mu w) &= F\left(\sum_{k=1}^n (\lambda x_k \mu y_k) v_k\right) = \\
 &= \sum_{k=1}^n (\lambda x_k \mu y_k) a_k = \\
 &= \lambda \sum_{k=1}^n x_k a_k + \mu \sum_{k=1}^n y_k a_k = \\
 &= \lambda F(v) + \mu F(w)
 \end{aligned}$$

$\implies F$  è lineare

Unicità Supponiamo di avere due funzioni lineari  $F, G : V \rightarrow W$  tali che  $F(v_i) = G(v_i) = a_i \ \forall i = 1, \dots, n$  e dimostro che  $F = G$ , cioè che  $F(v) = G(v) \ \forall v \in V$  Possiamo scrivere  $v = \sum_{k=1}^n x_k v_k$  quindi

$$\begin{aligned}
 F(v) &= F\left(\sum_{k=1}^n x_k v_k\right) \\
 &= \sum_{k=1}^n x_k F(v_k) \\
 &= \sum_{k=1}^n x_k a_k
 \end{aligned}$$

Inoltre

$$\begin{aligned}
 G(v) &= G\left(\sum_{k=1}^n x_k v_k\right) \\
 &= \sum_{k=1}^n x_k G(v_k) \\
 &= \sum_{k=1}^n x_k a_k
 \end{aligned}$$

$\implies F(v) = G(v) \ \forall v \in V$

$\implies F = G$

□

## 5.1 Matrice associata ad una applicazione lineare

Siano  $V$  e  $W$  spazi vettoriali su un campo  $\mathbb{K}$  con  $V, W$  entrambi finitamente generati. Supponiamo  $\dim V = n$  e  $\dim W = m$ .

Considero  $F : V \rightarrow W$  lineare, e fisso  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$  base di  $V$  e  $\mathcal{C} = \{w_1, \dots, w_m\}$  base di  $W$ .

$$\begin{aligned} F(v_1) &= a_{11}w_1 + a_{21}w_2 + \dots + a_{m1}w_m = \sum_{k=1}^m a_{k1}w_k \\ F(v_2) &= a_{12}w_1 + a_{22}w_2 + \dots + a_{m2}w_m = \sum_{k=1}^m a_{k2}w_k \\ &\dots \\ F(v_n) &= a_{1n}w_1 + a_{2n}w_2 + \dots + a_{mn}w_m = \sum_{k=1}^m a_{kn}w_k \end{aligned}$$

Tutto questo determina  $A = (a_{ij}) \in \mathbb{K}^{m,n}$ ,  $A$  è determinata da  $F, \mathcal{B}, \mathcal{C}$

Sia  $v \in V$  un vettore generico  $v = \sum_{k=1}^n x_k v_k$ ,  $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{K}$

$$\begin{aligned} F(v) &= F\left(\sum_{k=1}^n x_k v_k\right) = \sum_{k=1}^n x_k F(v_k) = \\ &= x_1 F(v_1) + x_2 F(v_2) + \dots + x_n F(v_n) = \\ &= x_1 \sum_{k=1}^m a_{k1}w_k + x_2 \sum_{k=1}^m a_{k2}w_k + \dots + x_n \sum_{k=1}^m a_{kn}w_k = \\ &= \sum_{k=1}^m (a_{k1}x_1)w_k + \sum_{k=1}^m (a_{k2}x_2)w_k + \dots + \sum_{k=1}^m (a_{kn}x_n)w_k = \\ &= \left(\sum_{r=1}^n a_{1r}x_r\right)w_1 + \left(\sum_{r=1}^n a_{2r}x_r\right)w_2 + \dots + \left(\sum_{r=1}^n a_{mr}x_r\right)w_m \end{aligned}$$

$$\text{Se } (v)_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

$$\implies \begin{pmatrix} F(v) \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

$$\implies \begin{pmatrix} F(v) \end{pmatrix} = A(v)_{\mathcal{B}}$$

**Notazione** Si indica  $A$  con  $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F)$ , matrice che rappresenta  $F$  rispetto alle basi  $\mathcal{B}$  e  $\mathcal{C}$

**Esempio (5.1)** Sia  $I : V \rightarrow V$  funzione identità, e calcoliamo  $M^{\mathcal{B},\mathcal{B}}(I)$  dove  $\mathcal{B}$  è una base fissata di  $V$ . Se  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$  risulta  $I(v_i) = v_i \forall i = 1, \dots, n$

$$\implies M^{\mathcal{B},\mathcal{B}}(I) = Id \text{ matrice identità}$$

**Esempio (5.2)** Sia  $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ ,

$$F(x_1, x_2, x_3) = (3x_1 - x_2, 2x_2 + 3x_3)$$

Sia  $\mathcal{B}$  la base canonica di  $\mathbb{R}^3$  e  $\mathcal{C}$  la base canonica di  $\mathbb{R}^2$ , voglio trovare  $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F)$

$$\text{Possiamo scrivere } F \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

Sono noti  $F(1, 0, 0) = (3, 0)$ ,  $F(0, 1, 0) = (-1, 2)$  e  $F(0, 0, 1) = (0, 3)$ , quindi

$$M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F) = \begin{pmatrix} 3 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

In generale data  $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  espressa in termini della base canonica di  $\mathbb{R}^n$  e  $\mathbb{R}^m$  la matrice che rappresenta  $F$  è la matrice le cui colonne sono  $F(e_1), \dots, F(e_n)$

**Esempio (5.3)** Data  $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ :  $(x_1, x_2, x_3) \mapsto (4x_1 - x_3, x_1 + x_2 + x_3)$

Si ha

$$M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F) = \begin{pmatrix} 4 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$



**Esempio (5.4)**  $F : \mathbb{K}^{n,n} \rightarrow \mathbb{K}$ :  $A \mapsto \text{tr}(A)$  e determino la matrice che rappresenta  $F$  rispetto alla base canonica di  $\mathbb{K}^{n,n}$ ,  $\mathcal{B} = E_{i_1 j}$  e alla base canonica di  $\mathbb{K}$   $\mathcal{C} = \{1\}$

Si ha

$$M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F) = \begin{pmatrix} \text{tr}(E_{11}) & \text{tr}(E_{12}) & \cdots & \text{tr}(E_{1n}) & \text{tr}(E_{21}) & \text{tr}(E_{22}) & \cdots & \text{tr}(E_{nn}) \end{pmatrix}$$

Per esempio se  $n = 2$  risulta  $M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

**Esempio (5.5)** Sia  $a \in V_3$  e  $F : V_3 \rightarrow V_3$ :  $x \mapsto a \wedge x$  funzione lineare.

Sia  $\mathcal{B} = \{i, j, k\}$  base ortonormale positiva di  $V_3$  e calcolo  $M^{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(F)$ , scriviamo  $a = a_1 i + a_2 j + a_3 k$

$$F(i) = a \wedge i = (a_1 i + a_2 j + a_3 k) \wedge i = -a_2 k + a_3 j$$

$$F(j) = a \wedge j = (a_1 i + a_2 j + a_3 k) \wedge j = a_1 k - a_3 i$$

$$F(k) = a \wedge k = (a_1 i + a_2 j + a_3 k) \wedge k = -a_1 j + a_2 i$$

Si ha

$$M^{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(F) = \begin{pmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{pmatrix}$$

**Esercizio** Sia  $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^{2,2}$ ,  $F(a, b, c) = \begin{pmatrix} a & a+b \\ a+b+c & 0 \end{pmatrix}$

Sia  $\mathcal{B}$  base canonica di  $\mathbb{R}^3$  e  $\mathcal{C}$  base canonica di  $\mathbb{R}^{2,2}$

Si trovi  $M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F)$

**Soluzione** Da risolvere

## 5.2 Immagine di sottospazi vettoriali

Siano  $V$  e  $W$  spazi vettoriali su un campo  $\mathbb{K}$  e sia  $F : V \rightarrow W$  lineare, sia  $H \subseteq V$  sottospazio vettoriale,  $F(H)$  immagine di  $H$  tramite  $F$ , tale che  $F(H) \subseteq W$ ,  $F(H) = \{F(h) | h \in H\}$

**Proposizione p.vi**  $F(H)$  è sempre un sottospazio vettoriale di  $W$

**dim. (p.vi)** Siano  $w_1, w_2 \in F(H)$ ,  $\lambda, \mu \in \mathbb{K}$  e dimostriamo che  $\lambda w_1 + \mu w_2 \in F(H)$

$$w_1 \in F(H) \implies w_1 = F(h_1) \text{ per qualche } h_1 \in H$$

$$w_2 \in F(H) \implies w_2 = F(h_2) \text{ per qualche } h_2 \in H$$

$$\lambda w_1 + \mu w_2 = \lambda F(h_1) + \mu F(h_2) = F(\lambda h_1 + \mu h_2)$$

Poiché  $H$  è un sottospazio vettoriale, risulta che, dato  $h = \lambda h_1 + \mu h_2$

$$\implies \lambda w_1 + \mu w_2 = F(h) \text{ per qualche } h \in H$$

$$\implies \lambda w_1 + \mu w_2 \in F(H)$$

$$\implies F(H) \text{ sottospazio vettoriale di } V$$

□

Supponiamo  $\dim H = n$ ,  $\dim F(H) = ?$

Sia  $\mathcal{B} = \{h_1, \dots, h_n\}$  base di  $H$ , sappiamo che  $\{F(h_1), \dots, F(h_n)\}$  è un insieme di generatori di  $F(H)$

$$\implies \dim F(H) \leq n$$

**Esercizio** Sia  $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^4$  la funzione lineare data da

$$F(x_1, x_2, x_3) = (2x_1 - x_3, x_1 + x_2 + x_3, x_1 - x_2, x_2 - x_3)$$

Sia  $H \subseteq \mathbb{R}^3$  il sottospazio  $H = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 \mid x_1 + x_2 = 0\}$ ,  $\dim H = 2$

Si trovi una base di  $F(H)$

**Soluzione**

1. Trovo una base di  $H$ , per esempio  $\{(1, -1, 0), (0, 0, 1)\}$
2. Calcolo le immagini dei vettori della base

$$F(1, -1, 0) = (2, 0, 2, -1)$$

$$F(0, 0, 1) = (-1, 1, 0, -1)$$

Questi due vettori sono linearmente indipendenti, allora formano una base di  $F(H)$

**Definizione** Sia  $F : V \rightarrow W$  lineare,  $F(V)$  (che è un sottospazio vettoriale di  $W$ ) si dice l'immagine di  $F$

**Osservazione (5.1)**  $F$  è suriettiva  $\iff F(V) = W \iff \dim F(V) = \dim W$  (criterio per testare la suriettività di una funzione lineare)

**Esercizio** Sia  $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ ,  $F(x, y, z) = (2x + 2y, x + z, x + 3y - 2z)$

1. Dire se  $F$  è suriettiva e in caso contrario trovare  $w \in \mathbb{R}^3$  tale che  $w \notin F(\mathbb{R}^3)$
2. Sia  $a = (1, 0, 1)$ ,  $b = (0, 1, 1)$ ,  $H = \mathcal{L}(a, b)$ . Dire se  $(4, 3, -2) \in F(H)$

**Soluzione**

1.  $F(\mathbb{R}^3) = \mathcal{L}(F(e_1), F(e_2), F(e_3))$

$$F(e_1) = (2, 1, 1)$$

$$F(e_2) = (2, 0, 3)$$

$$F(e_3) = (0, 1, -2)$$

Si osserva che  $F(e_1) = F(e_2) + F(e_3)$ , quindi i tre vettori sono linearmente dipendenti

Ma  $F(e_2)$  e  $F(e_3)$  sono linearmente indipendenti

$\implies F(\mathbb{R}^3)$  ha dimensione 2, ed i vettori  $(2, 0, 3), (0, 1, -2)$  ne formano una base.  $F$  non è suriettiva

$w \in \mathbb{R}^3$ ,  $w \notin F(\mathbb{R}^3) \iff w$  non è combinazione lineare di  $(2, 0, 3), (0, 1, -2)$ .

Per esempio  $w = (1, 0, 0)$  va bene, poiché non esistono  $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$  tali che  $(1, 0, 0) = \lambda(2, 0, 3) + \mu(0, 1, -2)$

2.  $F(H) = \mathcal{L}(F(a), F(b))$ .  $F(a) = (2, 2, -1)$ ,  $F(b) = (2, 1, 1)$ .  $F(a), F(b)$  sono linearmente indipendenti, quindi  $\dim F = 2$

$(4, 3, -2) \in F(H) \iff \exists \lambda, \mu \in \mathbb{R}$  tali che  $(4, -3, -2) = (2\lambda + 2\mu, 2\lambda + \mu, -\lambda + \mu)$

Il sistema non ha soluzione, pertanto  $(4, 3, -2) \notin F(H)$

4 nov 2021

**Definizione** Data  $F : V \rightarrow W$  applicazione lineare tra spazi vettoriali su uno stesso campo, il rango di  $F$  ( $\text{rank } F$ ) è la dimensione di  $F(V)$

Se  $\mathcal{B}$  è una base di  $V$  e  $\mathcal{C}$  è una base di  $W$ , ad  $F$  si associa la matrice  $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F)$  che rappresenta  $F$  rispetto alle basi fissate.

$$(F(v))_{\mathcal{C}} = M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F) \cdot (v)_{\mathcal{B}}$$

Il rango di  $F$  coincide con il rango della matrice  $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F)$

$\implies$  tutte le matrici associate ad  $F$  hanno lo stesso rango.

### 5.3 Retroimmagine di sottospazi

$F : V \rightarrow W$  applicazione lineare, sia  $K \subseteq W$  un sottospazio

$$F^{-1}(K) = \{w \in V \mid w = F(v) \text{ per qualche } v \in V\}$$

Si noti che  $F^{-1}(K) \neq \emptyset$ : sicuramente  $K$  contiene  $\underline{0}_W$  e sappiamo che  $F(\underline{0}_V) = \underline{0}_W$ .

**Proposizione p.vii**  $F^{-1}(K)$  è sempre un sottospazio vettoriale di  $V$ ,  $\forall K \subseteq W$  sottospazio vettoriale

**dim. (p.vii)** Fisso  $v, w \in F^{-1}(K)$ ,  $\lambda, \mu \in \mathbb{K}$  e dimostro che  $\lambda v + \mu w \in F^{-1}(K)$

$$\begin{cases} v \in F^{-1}(K) \implies v = F^{-1}(x) \text{ per qualche } x \in K, F(v) = x \\ w \in F^{-1}(K) \implies w = F^{-1}(y) \text{ per qualche } y \in K, F(w) = y \end{cases}$$

$$F(\lambda v + \mu w) = \lambda F(v) + \mu F(w) = \lambda x + \mu y \in K$$

poiché  $K$  è un sottospazio vettoriale

$$\implies F(\lambda v + \mu w) \in K$$

$$\implies \lambda v + \mu w \in F^{-1}(K)$$

$$\implies F^{-1}(K) \text{ sottospazio vettoriale di } V$$

□

$$\dim F(H) \leq \dim H,$$

$$\text{se } K \subseteq F(V) \implies \dim F^{-1}(K) \geq \dim K$$

### Esercizio

$$F: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^4, F(x_1, x_2, x_3) = (x_1 + x_2, 2x_1 + x_2 + x_3, x_1 + x_3, x_2 - x_3)$$

$$K = \{(y_1, y_2, y_3, y_4) \in \mathbb{R}^4 \mid y_1 + y_2 = 0\} \quad \dim K = 3$$

Si determini  $F^{-1}(K)$

**Soluzione** Voglio trovare le  $(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3$  tali che  $F(x_1, x_2, x_3) \in K$

$$F(x_1, x_2, x_3) \in K \iff (x_1 + x_2) + 2x_1 + x_2 + x_3 = 0$$

$3x_1 + 2x_2 + x_3 = 0$  è l'equazione di  $F^{-1}(K)$  ( $\dim F^{-1}(K) = 2$ )

Trovo una base di  $F^{-1}(K)$

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

$$\mathcal{B} = \{(1, 0, -3), (0, 1, -2)\} \quad \text{è una base di } F^{-1}(K)$$

Altro approccio risolutivo:

Fisso una base di  $K$ , per esempio

$$\{w_1 = (1, -1, 0, 0), w_2 = (0, 0, 1, 0), w_3 = (0, 0, 0, 1)\}$$

$$F^{-1}(K) = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 \mid F(x_1, x_2, x_3) = \lambda_1 w_1 + \lambda_2 w_2 + \lambda_3 w_3\}$$

per qualche  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \in \mathbb{R}$

Otengo il sistema

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = \lambda_1 \\ 2x_1 + x_2 + x_3 = -\lambda_1 \\ x_1 + x_3 = \lambda_2 \\ x_2 - x_3 = \lambda_3 \end{cases}$$

Si risolve il sistema in  $x_1, x_2, x_3, x_4$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \lambda_1 \\ 2 & 1 & 1 & -\lambda_1 \\ 1 & 0 & 1 & \lambda_2 \\ 0 & 1 & -1 & \lambda_2 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{si riduce per righe}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \lambda_1 \\ 0 & -1 & 1 & -3\lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_2 + 2\lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_3 + 3\lambda_1 \end{pmatrix}$$

Affinché il sistema sia risolubile si deve avere

$$\lambda_2 + 2\lambda_1 = 0; \quad \lambda_3 + 3\lambda_1 = 0$$

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = \lambda_1 \\ -x_2 + x_3 = -3\lambda_1 \\ \lambda_2 + 2\lambda_1 = 0 \\ \lambda_3 + 3\lambda_1 = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} x_1 = -2\lambda_1 - \mu \\ x_2 = \mu + 3\lambda_1 \\ x_3 = \mu \end{cases}$$

Da qui si deduce una base di  $F^{-1}(K)$

## 5.4 Nucleo di una funzione lineare

$V, W$  spazi vettoriali su un campo  $\mathbb{K}$ ,  $F : V \rightarrow W$  lineare

$\implies \{0_W\}$  è sottospazio vettoriale di  $W$

$\implies F^{-1}(0_W)$  sottospazio vettoriale di  $V$

**Definizione**  $F^{-1}(0_W)$  si dice nucleo di  $F$  (kernel di  $F$ ) e si indica con  $\ker(F)$

$$\ker F = \{v \in V \mid F(v) = 0_W\}$$

**Teorema V**  $F$  è iniettiva  $\iff \ker F = 0_V$

*dim. (V)*

"  $\implies$  " Supponiamo  $F$  iniettiva e sia  $v \in \ker F$

$\implies F(v) = 0_W$ , ma poiché  $F$  è lineare risulta  $F(0_V) = 0_W$

$\implies F(v) = F(0_V)$  e poiché  $F$  è iniettiva risulta  $v = 0_V$

$\implies \ker F = \{0_V\}$

"  $\impliedby$  " Per ipotesi  $\ker F = \{0_V\}$ , siano  $v_1, v_2 \in V$  tali che  $F(v_1) = F(v_2)$

$\implies F(v_1) - F(v_2) = 0_W$ , poiché  $F$  è lineare si ottiene  $F(v_1 - v_2) = 0_W$

$\implies v_1 - v_2 \in \ker F$

$\implies v_1 - v_2 = 0_V$

$\implies v_1 = v_2$ , quindi  $F$  è iniettiva. □

Supponiamo  $V, W$  di dimensione finita,  $\dim V = n$  e  $\dim W = m$ , siano  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$  base di  $V$  e  $\mathcal{C} = \{w_1, \dots, w_m\}$  base di  $W$ , e si consideri  $M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F)$

$$\begin{aligned} \ker F &= \{v \in V \mid F(v) = \underline{0}_W\} = \\ &= \{v \in V \mid (F(v))_{\mathcal{C}} = \underline{0}_{\mathbb{K}^m}\} = \\ &= \{v \in V \mid M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F)(v)_{\mathcal{B}} = \underline{0}_{\mathbb{K}^m}\} = \\ &= \{v \in V \mid (v)_{\mathcal{B}} \text{ appartiene al null-space di } M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F)\} \end{aligned}$$

In particolare

$$\begin{aligned} \dim \ker F &= \\ &= \dim(\text{null-space di } M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F)) = \\ &= \dim V - \text{rank } M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F) = \\ &= \dim V - \text{rank } F \\ \dim V &= \dim \ker F + \text{rank } F \end{aligned}$$

Questo sopra enunciato è il teorema di nullità più rango in termini di una funzione lineare.

**Esercizio** Sia  $F : V \rightarrow W$  lineare. Fisso  $w_0 \in W$ , e definisco

$$F^{-1}(w_0) = \{v \in V \mid F(v) = w_0\}$$

Si diano condizioni necessarie e sufficienti affinché  $F^{-1}(w_0)$  sia sottospazio.

**Soluzione**

**Esercizio** Sia  $\mathcal{B} = \{v_1, v_2, v_3\}$  una base di uno spazio vettoriale  $V, 3\text{-dim}$ ,  $\mathcal{C} = \{w_1, w_2, w_3, w_4\}$  una base di uno spazio vettoriale  $W, 4\text{-dim}$

Sia  $g : V \rightarrow W$  la funzione lineare determinata dalle relazioni

$$\begin{cases} g(v_1) = w_1 + 2w_2 + w_3 \\ g(v_2) = w_1 + w_2 + w_4 \\ g(v_3) = w_2 + w_3 - w_4 \end{cases}$$

Si calcolino  $g(V)$  e  $\ker g$

**Soluzione** Possiamo calcolare  $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(g)$

$$M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(g) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Per calcolare  $\ker g$  devo calcolare il null-space di  $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(g)$ , cioè

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

Riduco  $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(g)$  per righe:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \xrightarrow[R_3 \rightarrow R_3 - R_1]{R_2 \rightarrow R_2 - 2R_1} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \rightarrow$$

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

$$\rightarrow \begin{cases} x_1 + x_2 = 0 \\ x_2 - x_3 = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x_1 = -\lambda \\ x_2 = \lambda \\ x_3 = \lambda \end{cases}$$

Quindi

$$\ker g = \{-\lambda v_1 + \lambda v_2 + \lambda v_3 | \lambda \in \mathbb{K}\} = \mathcal{L}(v_1 - v_2 - v_3)$$

$g(V)$  ha dimensione 2. Per esercizio si trovi una base di  $g(V)$

**Notazione** Spesso l'immagine di una funzione lineare  $F$  si indica con  $\text{Im}(F)$



**Teorema VI** Sia  $F : V \rightarrow W$  una funzione lineare tra spazi vettoriali su un campo  $\mathbb{K}$ .

$F$  è iniettiva  $\iff F$  porta insiemi liberi di vettori di  $V$  in insiemi liberi di vettori di  $W$

*dim.* (VI)

"  $\implies$  " Supponiamo  $F$  iniettiva e sia  $\{v_1, \dots, v_l\} \subseteq V$  un insieme libero, e dimostriamo che  $\{F(v_1), \dots, F(v_l)\}$  è un insieme libero in  $W$

Considero  $\lambda_1, \dots, \lambda_l \in \mathbb{K}$  tali che

$$\lambda_1 F(v_1) + \lambda_2 F(v_2) + \dots + \lambda_l F(v_l) = \underline{0}_W$$

Poiché  $F$  è lineare risulta

$$F(\lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 + \dots + \lambda_l v_l) = \underline{0}_W$$

$\implies \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 + \dots + \lambda_l v_l \in \ker F$ , ma poiché  $F$  iniettiva  $\ker F = \{\underline{0}_W\}$

$\implies \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 + \dots + \lambda_l v_l = \underline{0}_V$ , ma  $\{v_1, \dots, v_l\}$  è libero

$\implies \lambda_1 = \dots = \lambda_l = 0$

$\implies \{F(v_1), \dots, F(v_l)\}$  è libero

"  $\impliedby$  " Per ipotesi  $F$  porta insiemi liberi in insiemi liberi. Si fissa  $v \in V$ ,  $v \neq \underline{0}_V$ , quindi  $\{v\}$  è libero

$\implies \{F(v)\}$  è libero

$\implies F(v) \neq \underline{0}_W$

$\implies \ker F = \{\underline{0}_V\}$

$\implies F$  è iniettiva □

**Definizione** Una funzione lineare sia iniettiva che suriettiva si dice un isomorfismo

$F : V \rightarrow W$  è un isomorfismo  $\iff \text{Im}(F) = W$  e  $\ker F = \{\underline{0}_V\}$

### Teorema VII

1. Sia  $F : V \rightarrow W$  lineare con  $V, W$  finitamente generati e tali che  $\dim V = \dim W$ .

$F$  è iniettiva  $\iff F$  è suriettiva

2.  $F : V \rightarrow V$  lineare con  $V$  finitamente generato è un isomorfismo  $\iff$  iniettiva  $\iff$  suriettiva

**Definizione** Un isomorfismo  $F : V \rightarrow V$  si dice un automorfismo di  $V$

*dim.* (VII)

1.  $\dim V = \dim W, \dim V = \dim \ker(F) + \dim \operatorname{Im}(F)$

$$\implies \dim W = \dim \ker(F) + \dim \operatorname{Im}(F)$$

- Se  $F$  è suriettiva

$$\implies \dim W = \dim \operatorname{Im}(F)$$

$$\implies \dim \ker(F) = 0$$

$$\implies \ker F = \{0_V\}$$

$$\implies F \text{ è iniettiva}$$

- Se  $F$  è iniettiva

$$\implies \dim \ker F = 0$$

$$\implies \dim W = \dim \operatorname{Im} F$$

$$\implies W = \operatorname{Im} F$$

$$\implies F \text{ è suriettiva}$$

2. Segue dal punto 1. □

**Esempio (5.6)**  $V$  spazio vettoriale su un campo  $\mathbb{K}$ ,  $\mathcal{B}$  base di  $V$

$$\begin{aligned} V &\xrightarrow{L_{\mathcal{B}}} \mathbb{K}^n \\ v &\mapsto (v)_{\mathcal{B}} \end{aligned}$$

è un isomorfismo

## 5.5 Proprietà delle funzioni lineari

8 nov 2021

**Proposizione p.viii** La composizione di funzioni lineari è sempre una funzione lineare

**dim. (p.viii)** Siano  $V, W, Z$  spazi vettoriali su un campo  $\mathbb{K}$ ,  $F : V \rightarrow W$ ,  $G : W \rightarrow Z$  funzioni lineari, e prendiamo

$$V \xrightarrow{F} W \xrightarrow{G} Z$$

ovvero  $G \circ F$ , quindi  $G \circ F(v) = G(F(v))$

Siano  $v, w \in V$ ,  $\lambda, \mu \in \mathbb{K}$

$$G \circ F(\lambda v + \mu w) =$$

dato che  $F$  è lineare

$$= G(F(\lambda v + \mu w)) = G(\lambda F(v) + \mu F(w)) =$$

dato che  $G$  è lineare

$$= \lambda G(F(v)) + \mu G(F(w)) = \lambda(G \circ F)(v) + \mu(G \circ F)(w)$$

**Proposizione p.ix** Siano  $V, W$  spazi vettoriali su un campo  $\mathbb{K}$ , sia  $F : V \rightarrow W$  lineare biettiva ( $F$  è un isomorfismo),

$$F^{-1} : W \rightarrow V \text{ è lineare}$$

Questa proprietà ci mostra quanto sia rigida la linearità di una funzione

**dim. (p.ix)**  $F^{-1}(a)$  è l'unico  $x \in V$  tale che  $F(x) = a$

Siano  $a, b \in W$ ,  $\lambda, \mu \in \mathbb{K}$ , dimostro che

$$F^{-1}(\lambda a + \mu b) = \lambda F^{-1}(a) + \mu F^{-1}(b)$$

Denoto  $x = F^{-1}(a)$  e  $y = F^{-1}(b)$ : ciò significa  $F(x) = a$  e  $F(y) = b$

$$F(\lambda x + \mu y) = \lambda F(x) + \mu F(y) = \lambda a + \mu b$$

$\implies$  per come è definita  $F^{-1}$  questo implica

$$F^{-1}(\lambda a + \mu b) = \lambda x + \mu y = \lambda F^{-1}(a) + \mu F^{-1}(b)$$

$\implies F^{-1}$  è lineare

□

### Esempi (5.7)

- $V = \mathbb{K}^n$ ,  $A \in \mathbb{K}^{n,n}$  invertibile,

$$F_A : \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^n$$
$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \mapsto A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Se  $A$  è invertibile, esiste  $A^{-1} \in \mathbb{K}^{n,n}$  tale che  $A^{-1}A = AA^{-1} = \text{Id}$  dove  $\text{Id} \in \mathbb{K}^{n,n}$  è la matrice identità.

Posso considerare

$$F_A^{-1} : \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^n$$
$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \mapsto A^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

$$F_{A^{-1}} \circ F_A(x) = F_{A^{-1}}(F_A(x)) = A^{-1}(Ax) = \text{Id} \cdot x = x$$

$$\implies F_{A^{-1}} \circ F_A \text{ è la funzione identità } I : \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^n$$

$$\implies F_A \text{ è invertibile e la sua inversa è } F_{A^{-1}}$$

- Sia  $V$  uno spazio vettoriale su un campo  $\mathbb{K}$ , finitamente generato.

Fisso  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$  una base di  $V$ ,

$$F : V \rightarrow \mathbb{K}^n$$
$$v = \sum_{i=1}^n x_i v_i \mapsto \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

funzione lineare iniettiva, poiché il suo nucleo è banale; poiché  $V$  e  $\mathbb{K}^n$  hanno la stessa dimensione, la funzione è un isomorfismo

Si noti che

$$F(v_1) = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

con un unico 1 nella posizione  $i$ -esima, quindi la base di  $V$  viene portata tramite  $F$  nella base canonica di  $\mathbb{K}^n$

**Definizione** Due spazi vettoriali  $V, W$  sullo stesso campo  $\mathbb{K}$  sono isomorfi se esiste  $F : V \rightarrow W$  isomorfismo

**Proposizione p.x** Supponiamo che  $V$  e  $W$  siano due spazi vettoriali su un campo  $\mathbb{K}$ , entrambi finitamente generati.

$V$  è isomorfo a  $W \iff V$  e  $W$  hanno la stessa dimensione

*dim.* (p.x)

"  $\implies$  " Supponiamo che esiste  $F : V \rightarrow W$  isomorfismo,

$$F \text{ iniettiva} \implies \dim \text{Im}(F) = \dim V$$

$$F \text{ suriettiva} \implies \dim F(V) = \dim W$$

$$\implies \dim V = \dim W$$

"  $\impliedby$  " Supponiamo  $\dim V = \dim W = n$ . Sia  $\mathcal{B}$  base di  $V$  e  $\mathcal{C}$  base di  $W$

$$\begin{aligned} F : V &\rightarrow \mathbb{K}^n \\ v &\mapsto (v)_{\mathcal{B}} \end{aligned}$$

un isomorfismo,

$$\begin{aligned} G : W &\rightarrow \mathbb{K}^n \\ w &\mapsto (w)_{\mathcal{C}} \end{aligned}$$

un isomorfismo

$$V \xrightarrow{F} \mathbb{K}^n \xleftarrow{G} W \implies V \xrightarrow{F} \mathbb{K}^n \xrightarrow{G^{-1}} W$$

Considero  $G^{-1} \circ F$ , biettiva

$$\implies G^{-1} \circ F \text{ è un isomorfismo}$$

$$\implies V, W \text{ sono isomorfi}$$

□

## 5.6 Funzioni lineari e cambiamenti di base

Siano  $V, W$  spazi vettoriali su un campo  $K$ , entrambi finitamente generati

$$\dim V = n, \dim W = m$$

Considero  $F : V \rightarrow W$  lineare, e fisso  $\mathcal{B}$  base di  $V$  e  $\mathcal{C}$  base di  $W$ .

$F$  è rappresentata da una matrice  $A = M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F) \in \mathbb{K}^{m, n}$  tramite la relazione

$$(F(v))_{\mathcal{C}} = M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F) \cdot (v)_{\mathcal{B}}$$

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{F} & W \\ \text{iso} \downarrow & & \downarrow \text{iso} \\ \mathbb{K}^n & \xrightarrow{F_A} & \mathbb{K}^m \end{array}$$

Questo è un diagramma commutativo

Considero altre due base  $\mathcal{B}'$  di  $V$  e  $\mathcal{C}'$  di  $W$ .

Rispetto a queste basi, ad  $F$  corrisponde un'altra matrice  $M^{\mathcal{B}', \mathcal{C}'}(F)$ , voglio campire come  $M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F)$  e  $M^{\mathcal{B}', \mathcal{C}'}(F)$  sono relazionate.

Indico  $A = M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F)$  e  $A' = M^{\mathcal{B}', \mathcal{C}'}(F)$

Sia  $v \in V$  quindi

$$(v)_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = x \in \mathbb{K}^n$$

e

$$(v)_{\mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix} = x' \in \mathbb{K}^n$$

So che  $x = Px'$  con  $P \in \mathbb{K}^{n, n}$  invertibile del cambiamento di base da  $\mathcal{B}$  a  $\mathcal{B}'$ . Considero  $F(v) \in W$

$$(F(v))_{\mathcal{C}} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = y \in \mathbb{K}^m$$

$$(F(v))_{\mathcal{C}'} = \begin{pmatrix} y'_1 \\ \vdots \\ y'_n \end{pmatrix} = y' \in \mathbb{K}^m$$

So che  $y = Qy'$ , con  $Q$  matrice del cambiamento di base da  $\mathcal{C}$  a  $\mathcal{C}'$ , dove  $Q \in \mathbb{K}^{m,m}$  è invertibile

$$y = Ax, y' = A'x, x = Px', y = Qy'$$

$$Qy' = Ax \implies Qy' = APx'$$

$$\implies y' = Q^{-1}APx'$$

$$\implies A'x' = Q^{-1}APx' \quad \forall x' \in \mathbb{K}^n$$

$$\implies A' = Q^{-1}AP$$

### 5.6.1 Caso particolare

$W = V$ , quindi  $F : V \rightarrow V$  e considero  $\mathcal{C} = \mathcal{B}'$  e  $\mathcal{C}' = \mathcal{B}'$  ( $\implies Q = P$ ).

In questo caso la formula implica  $A' = P^{-1}AP$  dove  $P$  è la matrice del cambiamento di base da  $\mathcal{B}$  a  $\mathcal{B}'$

**Definizione** Due matrici  $A, B \in \mathbb{K}^{n,n}$  sono simili se esiste  $P \in \mathbb{K}^{n,n}$  matrice invertibile tale che  $B = P^{-1}AP$

**Esercizio** Siano  $A, B \in \mathbb{K}^{n,n}$  matrici simili

$$\implies \det A = \det B, \operatorname{tr} A = \operatorname{tr} B, \operatorname{rank} A = \operatorname{rank} B$$

**Soluzione** Supponiamo  $A, B$  simili, allora esiste  $P \in \mathbb{K}^{n,n}$  invertibile tale che  $B = P^{-1}AP$

Per il teorema di Binet:

$$\det B = \det(P^{-1}) \det A \det P = \det A$$

Poi

$$\operatorname{tr} B = \operatorname{tr}(P^{-1}AP) = \operatorname{tr}(P^{-1}PA) = \operatorname{tr} A$$

Poiché  $P$  e  $P^{-1}$  hanno rango  $n$ , risulta

$$\operatorname{rank}(P^{-1}AP) = \operatorname{rank} A$$

**Esercizio** Si verifichi che la similitudine (la proprietà di due matrici di essere simili) in  $\mathbb{K}^{n,n}$  è una relazione di equivalenza

**Soluzione** Indico con  $\sim$  la relazione

$$A \sim B \text{ se esiste } P \in \mathbb{K}^{n,n} \text{ invertibile } | B = P^{-1}AP$$

- $\sim$  è riflessiva,  $A = (\text{Id})^{-1}A \cdot \text{Id} \implies A \sim A$

- $\sim$  è simmetrica, infatti, se  $A \sim B$

$$\implies B = P^{-1}AP$$

$$\implies A = PBP^{-1}$$

$$\implies B \sim A$$

- Supponiamo  $A \sim B$  e  $B \sim C$  e dimostro  $A \sim C$

$$A \sim B \implies B = P^{-1}AP \quad B \sim C \implies C = Q^{-1}BQ$$

$$\implies C = Q^{-1}P^{-1}APQ = (PQ)^{-1}A(PQ)$$

$$\implies A \sim C$$

□

**Esercizio** In  $\mathbb{R}^3$  considero la base canonica  $\mathcal{B} = e_1, e_2, e_3$  e la base data dai tre vettori

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

1. Si verifichi che  $\mathcal{C} = \{v_1, v_2, v_3\}$  sia una base di  $\mathbb{R}^3$
2. Sia  $F$  la funzione lineare  $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  determinata dalle relazioni

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

$$F(v_2) = 2v_1 - v_2$$

$$F(v_3) = -v_2 + v_3$$

Si trovi la matrice che rappresenta  $F$  rispetto alla base  $\{v_1, v_2, v_3\}$  e la matrice che rappresenta  $F$  rispetto alla base canonica  $\mathcal{B}$



### Soluzione

1. Sia

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

si noti che  $\det A \neq 0$ , quindi i tre vettori sono linearmente indipendenti, ovvero sono una base

2.

$$M^{\mathcal{C},\mathcal{C}}(F) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$M^{\mathcal{B},\mathcal{B}}(F)$ : per quanto visto oggi  $M^{\mathcal{C},\mathcal{C}}(F) = P^{-1}M^{\mathcal{B},\mathcal{B}}(F)P$

$$\implies M^{\mathcal{B},\mathcal{B}}(F) = PM^{\mathcal{C},\mathcal{C}}(F)P^{-1}$$

**Definizione** Sia  $V$  uno spazio vettoriale di dimensione finita, e sia  $F : V \rightarrow V$  lineare. Se  $\mathcal{B}$  è la base fissata di  $V$ , allora  $M^{\mathcal{B},\mathcal{B}}(F)$ , si definisce

$$\det F = \det(M^{\mathcal{B},\mathcal{B}}(F))$$

e

$$\operatorname{tr} F = \operatorname{tr}(M^{\mathcal{B},\mathcal{B}}(F))$$

Per un risultato precedente,  $\operatorname{tr} F$  e  $\det F$  sono ben definiti, ovvero non dipendono dalla base fissata, mentre  $M^{\mathcal{B},\mathcal{B}}(F)$  sì

**Attenzione** Esistono matrici  $A, B \in \mathbb{K}^{n,n}$  tali che  $\operatorname{tr} A = \operatorname{tr} B$ ,  $\det A = \det B$ ,  $\operatorname{rank} A = \operatorname{rank} B$  ma non simili

### Esempio (5.8)

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2,2} \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2,2}$$

Notiamo che  $\det A = \det B$ ,  $\operatorname{tr} A = \operatorname{tr} B$ ,  $\operatorname{rank} A = \operatorname{rank} B$ , ma  $A$  e  $B$  non sono simili, infatti

$$P^{-1}AP = \operatorname{Id} \forall P \in \operatorname{GL}(2, \mathbb{R}), B \neq \operatorname{Id}$$

## 5.7 Spazio delle funzioni lineari

### 5.7.1 Somma di funzioni lineari

Siano  $V, W$  spazi vettoriali sullo stesso campo  $\mathbb{K}$ . Siano  $F, G : V \rightarrow W$  lineari. Si introduce

$$\begin{aligned} F + G : V &\rightarrow W \\ v &\mapsto F(v) + G(v) \end{aligned}$$

funzione da  $V$  in  $W$

**Esercizio** Si dimostri che  $F + G$  è funzione lineare

**Soluzione** Da fare

### 5.7.2 Prodotto per scalari di funzioni lineari

Si introduce inoltre, se  $\lambda \in \mathbb{K}$ , la funzione

$$\begin{aligned} \lambda F : V &\rightarrow W \\ v &\mapsto \lambda F(v) \end{aligned}$$

**Esercizio** Si dimostri che  $\lambda F$  è funzione lineare

**Soluzione** Da fare

---

Indico con

$$L(V, W) = \{F : V \rightarrow W \mid F \text{ lineare}\}$$

$L(V, W)$  eredita una struttura di spazio vettoriale su  $\mathbb{K}$ , dove il vettore nullo di  $L(V, W)$  è la funzione costante

$$\begin{aligned} 0_{L(V, W)} : V &\rightarrow W \\ v &\mapsto \underline{0}_W \end{aligned}$$

9 nov 2021 Suppongo che  $V$  e  $W$  abbiano dimensione finita,  $\dim V = n, \dim W = m$ . Fisso  $\mathcal{B}$  base di  $V$  e  $\mathcal{C}$  base di  $W$ , ogni  $F \in L(V, W)$  induce la matrice  $M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(F) \in \mathbb{K}^{m, n}$

Abbiamo quindi una funzione

$$M^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} : L(V, W) \rightarrow \mathbb{K}^{m, n}$$

**Esercizio** La funzione  $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}$  è un isomorfismo di spazi vettoriali:

- $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}$  è lineare cioè

$$\begin{aligned} M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F + G) &= M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F) + M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(G) \\ M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(\lambda F) &= \lambda M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F) \end{aligned}$$

- $\ker(M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}) = \underline{0}_{L(V,W)} \implies M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}$  è iniettiva
- $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}$  è suriettiva, cioè

$$M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}\left(L(V, W)\right) = \mathbb{K}^{m,n}$$

**Soluzione** Da fare

## 5.8 Composizione di funzioni lineari

Siano  $V, W, Z$  spazi vettoriali sullo stesso campo  $\mathbb{K}$ .

$$V \xrightarrow{F} W \xrightarrow{G} Z \implies G \circ F : V \rightarrow Z \text{ è lineare}$$

Supponiamo che  $V, W, Z$  abbiano dimensione finita. Siano  $\mathcal{B}$  una base di  $V$ ,  $\mathcal{C}$  una base di  $W$  e  $\mathcal{D}$  una base di  $Z$ . Abbiamo  $M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F)$  e  $M^{\mathcal{C},\mathcal{D}}(G)$  matrici, con

$$M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F) \cdot (v)_{\mathcal{B}} = (F(v))_{\mathcal{C}} \text{ e } M^{\mathcal{C},\mathcal{D}}(G) \cdot (w)_{\mathcal{C}} = (G(w))_{\mathcal{D}}$$

Considero

$$\begin{aligned} ((G \circ F)(v))_{\mathcal{D}} &= (G(F(v)))_{\mathcal{D}} = \\ &= M^{\mathcal{C},\mathcal{D}}(G) \cdot (F(v))_{\mathcal{C}} = \\ &= M^{\mathcal{C},\mathcal{D}}(G) \cdot M^{\mathcal{B},\mathcal{C}}(F) \cdot (v)_{\mathcal{B}} \end{aligned}$$

cioè la matrice che rappresenta  $G \circ F$  rispetto alle basi  $\mathcal{B}$  e  $\mathcal{D}$  è il prodotto della matrice che rappresenta  $G$  per la matrice che rappresenta  $F$

**Esercizio** Siano  $F : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^3$ ,  $H : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^2$  le funzioni lineari definite come

$$F \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \\ x_2 - x_3 + 3x_4 \\ 2x_1 + 2x_2 - x_3 - x_4 \end{pmatrix}$$

$$H \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + 2x_2 - 3x_4 \\ x_1 + x_2 + x_3 - 2x_4 \end{pmatrix}$$

Si determini (se esiste) una funzione lineare  $G : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$  tale che  $H = G \circ F$

**Soluzione**  $F$  è rappresentata dalla matrice

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 3 \\ 2 & 2 & -1 & -1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3,4}$$

$H$  è rappresentata dalla matrice

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

Sia  $C$  la matrice che rappresenta  $G$

$\implies C$  soddisfa  $B = C \cdot A$  con  $B$  e  $A$  note e  $C$  matrice incognita. Studio il sistema matriciale, che posso scrivere nella forma  ${}^t B = {}^t A X$ , con  $X = {}^t C$

**Osservazione (5.2)** Siano  $A \in \mathbb{K}^{m,n}$ ,  $B \in \mathbb{K}^{p,m}$ , con  $BA \in \mathbb{K}^{p,n}$ . Si noti che

$$\text{rank } BA \leq \min\{\text{rank } A, \text{rank } B\}$$

Motivazione geometrica:  $A$  induce

$$F_A : \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^m$$

$$x \mapsto Ax$$

e  $\text{rank } A = \dim \text{Im}(F_A)$

$B$  induce

$$\begin{aligned} F_B : \mathbb{K}^m &\rightarrow \mathbb{K}^p \\ x &\mapsto Bx \end{aligned}$$

e  $\text{rank } B = \dim \text{Im}(F_B)$

$BA$  induce

$$\begin{aligned} F_{BA} : \mathbb{K}^n &\rightarrow \mathbb{K}^p \\ x &\mapsto BAx \end{aligned}$$

e  $\text{rank } BA = \dim \text{Im}(F_{BA})$

Ma  $\text{Im}(F_{BA}) \subseteq \text{Im}(F_B)$ , perché  $F_{BA} = F_B \circ F_A$ :

$$\mathbb{K}^n \xrightarrow{F_A} \mathbb{K}^m \xrightarrow{F_B} \mathbb{K}^p$$

$$\implies \dim \text{Im}(F_{BA}) \subseteq \dim \text{Im}(F_B) \implies$$

$$\text{rank } BA \leq \text{rank } B$$

Si noti che  $\ker F_A \subseteq \ker F_{BA}$ ; per il teorema del rango

$$n - \text{rank } A \leq n - \text{rank } BA$$

$$\implies \text{rank } BA \leq \text{rank } A$$

Ottengo quindi che

$$\text{rank } BA \leq \min\{\text{rank } A, \text{rank } B\}$$

**Definizione** Sia  $V$  uno spazio vettoriale su un campo  $\mathbb{K}$  e sia  $F : V \rightarrow V$  lineare (un automorfismo).  $F$  è *nilpotente* se  $\exists k \in \mathbb{N}$  tale che

$$\underbrace{F \circ F \circ \cdots \circ F}_{k\text{-volte}} = 0$$

con  $0 : V \rightarrow V$  funzione identicamente nulla

**Esempio (5.9)**

$$F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$$
$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$F$  è lineare e  $F \circ F \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $F$  è nilpotente.

$F$  è rappresentata dalla matrice  $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = A$ , infatti  $A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

**Definizione** Una matrice  $A \in \mathbb{K}^{n,n}$  tale che  $A^k$  è la matrice nulla per qualche  $k \in \mathbb{N}$  si dice nilpotente

**Definizione** Data  $F : V \rightarrow V$  lineare nilpotente,  $F$  ha grado di nilpotenza  $k$  se

$$\underbrace{F \circ \dots \circ F}_{k-\text{volte}} = 0 \wedge \underbrace{F \circ \dots \circ F}_{k-1-\text{volte}} \neq 0$$

**Esercizio** Si trovi una funzione  $F : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^4$  nilpotente con grado di nilpotenza 2

**Soluzione** Da fare

---

$F : V \rightarrow V$  lineare con  $V$  di dimensione finita. Possiamo usare il teorema di nullità più rango:

$$\dim V = \dim \ker(F) + \dim(\text{Im}(F))$$

ma in generale

$$V \neq \ker(F) + \text{Im}(F)$$

## 6 Spazi vettoriali Euclidei

Si consideri  $V$  spazio vettoriale su  $\mathbb{R}$

**Definizione** Un prodotto scalare su  $V$  è una funzione  $\cdot : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$  tale che:

1.  $v \cdot w = w \cdot v$  (simmetria)
2.  $(v_1 + v_2) \cdot w = v_1 \cdot w + v_2 \cdot w$
3.  $(\lambda v) \cdot w = \lambda(v \cdot w)$
4.  $v \cdot v \geq 0$  e  $v \cdot v = 0$  se e solo se  $v = \underline{0}$  ( $\cdot$  è definito positivo)

Si noti che  $\cdot$  è lineare in ogni componente

**Esempio (6.1)** In  $V_3$  è definito il prodotto scalare  $v \cdot w = \|v\| \|w\| \cos \hat{v}w$ . " $\cdot$ " definisce un prodotto scalare in  $V_3$

**Conseguenza** Su ogni spazio vettoriale di dimensione finita esiste un prodotto scalare, infatti se  $V$  è uno spazio vettoriale di dimensione finita, si fissa una base  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$  si definisce per  $x, y \in V$

$$x \cdot y = \left( \sum_{i=1}^n x_i v_i \right) \cdot \left( \sum_{j=1}^n y_j v_j \right) := \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

**Esempio (6.2)** Anche  $\mathbb{R}^{m,n}$  ha un prodotto scalare canonico, dato da

$$A \cdot B := \text{tr}({}^t B \cdot A)$$

1. Per le proprietà della traccia  $\text{tr}({}^t B \cdot A) = \text{tr}({}^t({}^t B \cdot A)) = \text{tr}({}^t A B) = B \cdot A$   
 $\implies \cdot$  è simmetrico

2.

$$(A + C) \cdot B = \text{tr}({}^t B(A + C)) = \text{tr}({}^t B A) + \text{tr}({}^t B C) = A \cdot B + C \cdot B$$

$\implies$  la proprietà 2 è verificata

3.

$$(\lambda A) \cdot B = \text{tr}({}^t B(\lambda A)) = \lambda \text{tr}({}^t B A) = \lambda A \cdot B$$

$\implies$  la proprietà 3 è verificata

4.  $A \cdot A = \text{tr}({}^t A A)$ ;

**Esempio (6.3)** Si consideri lo spazio vettoriale

$$\mathbb{R}_n[x] = \{p \in \mathbb{R}[x] \mid \deg p \leq n\}$$

spazio vettoriale su  $\mathbb{R}$  di dimensione  $n + 1$

Se  $p, q \in \mathbb{R}_n[x]$  possiamo scrivere  $p(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k$ ,  $q(x) = \sum_{k=0}^n b_k x^k$

Si definisce  $p \cdot q$  come

$$p \cdot q := \sum_{k=0}^n a_k b_k$$

**Definizione** Uno *spazio vettoriale euclideo* è uno spazio vettoriale su  $\mathbb{R}$  di dimensione finita in cui è stato fissato un prodotto scalare, indicato generalmente con  $(V, \cdot)$

In uno spazio vettoriale euclideo è definita la norma di un vettore come

$$\|v\| = \sqrt{v \cdot v}$$

$\|v\|$  definisce una funzione  $\|v\| : V \rightarrow \mathbb{R}_+$  dove  $\mathbb{R}_+ = \{t \in \mathbb{R} \mid t \geq 0\}$ . Si noti che

$$\|\lambda v\| = \sqrt{(\lambda v) \cdot (\lambda v)} = \sqrt{\lambda^2 v \cdot v} = |\lambda| \sqrt{v \cdot v} = |\lambda| \|v\|$$

**Esempio (6.4)** Su  $\mathbb{R}^3$  si consideri il prodotto scalare

$$x \cdot y = 2x_1y_1 + 3x_2y_2 + 5x_3y_3.$$

Rispetto a questo prodotto scalare risulta

$$\|x\| = \sqrt{2x_1^2 + 3x_2^2 + 5x_3^2}.$$

**Definizione** Due vettori  $v, w$  in uno spazio vettoriale euclideo sono *ortogonali* se  $v \cdot w = 0$

**Esercizio** In  $\mathbb{R}^3$  con il prodotto scalare

$$x \cdot y = 2x_1y_1 + 3x_2y_2 + 5x_3y_3$$

si trovino tutti i vettori ortogonali a  $(1, 1, 0)$

**Soluzione** Da fare