

I prodotti di uno spazio vettoriale

Dispense del corso di Geometria 1

Gabriel Antonio Videtta

A.A. 2022/2023



UNIVERSITÀ DI PISA

Indice

1	Introduzione al prodotto scalare	5
1.1	Prime definizioni	5
1.1.1	Prodotto scalare e vettori ortogonali rispetto a φ	5
1.1.2	Prodotto definito o semidefinito	6
1.2	Il radicale di un prodotto scalare	6
1.2.1	La forma quadratica q associata a φ e vettori (an)isotropi	6
1.2.2	Matrice associata a φ e relazione di congruenza	7
1.2.3	Studio del radicale V^\perp attraverso $M_{\mathcal{B}}(\varphi)$	8
1.2.4	Condizioni per la (semi)definitezza di un prodotto scalare	9
1.3	Formula delle dimensioni e di polarizzazione rispetto a φ	10
1.4	Il teorema di Lagrange e basi ortogonali	12
1.4.1	L'algoritmo di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt	12
1.5	Il teorema di Sylvester	14
1.5.1	Caso complesso	14
1.5.2	Caso reale e segnatura di φ	15
1.5.2.1	Classificazione delle segnature per $n = 1, 2, 3$	17
1.5.2.2	Metodo di Jacobi per il calcolo della segnatura	18
1.5.2.3	Criterio di Sylvester per la definitezza di un prodotto scalare	20
1.5.2.4	Sottospazi isotropi e indice di Witt	20
1.6	Isometrie tra spazi vettoriali	21
2	I prodotti hermitiani e complessificazione (non indicizzato)	25
3	Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)	32

1 Introduzione al prodotto scalare

Nota. Nel corso del documento, per V , qualora non specificato, si intenderà uno spazio vettoriale di dimensione finita n .

1.1 Prime definizioni

1.1.1 Prodotto scalare e vettori ortogonali rispetto a φ

Definizione (prodotto scalare). Un **prodotto scalare** su V è una forma bilineare simmetrica φ con argomenti in V .

Esempio. Sia $\varphi : M(n, \mathbb{K}) \times M(n, \mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{K}$ tale che $\varphi(A, B) = \text{tr}(AB)$.

- ▶ $\varphi(A + A', B) = \text{tr}((A + A')B) = \text{tr}(AB + A'B) = \text{tr}(AB) + \text{tr}(A'B) = \varphi(A, B) + \varphi(A', B)$ (linearità nel primo argomento),
- ▶ $\varphi(\alpha A, B) = \text{tr}(\alpha AB) = \alpha \text{tr}(AB) = \alpha \varphi(A, B)$ (omogeneità nel primo argomento),
- ▶ $\varphi(A, B) = \text{tr}(AB) = \text{tr}(BA) = \varphi(B, A)$ (simmetria),
- ▶ poiché φ è simmetrica, φ è lineare e omogenea anche nel secondo argomento, e quindi è una forma bilineare simmetrica, ossia un prodotto scalare su $M(n, \mathbb{K})$.

Definizione (vettori ortogonali). Due vettori $\underline{v}, \underline{w} \in V$ si dicono **ortogonali** rispetto al prodotto scalare φ , ossia $\underline{v} \perp \underline{w}$, se $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0$.

Definizione (somma diretta ortogonale). Siano U e $W \subseteq V$ due sottospazi di V in somma diretta. Allora si dice che U e W sono in **somma diretta ortogonale** rispetto al prodotto scalare φ di V , ossia che $U \oplus W = U \oplus^\perp W$, se $\varphi(\underline{u}, \underline{w}) = 0 \forall \underline{u} \in U, \underline{w} \in W$.

Definizione. Si definisce prodotto scalare *canonico* di \mathbb{K}^n la forma bilineare simmetrica $\varphi = \langle \cdot, \cdot \rangle$ con argomenti in \mathbb{K}^n tale che:

$$\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \langle \underline{v}, \underline{w} \rangle = \underline{v}^\top \underline{w}, \quad \forall \underline{v}, \underline{w} \in V.$$

Osservazione. Si può facilmente osservare che il prodotto scalare canonico di \mathbb{K}^n è effettivamente un prodotto scalare.

- ▶ $\varphi(\underline{v}_1 + \underline{v}_2, \underline{w}) = (\underline{v}_1 + \underline{v}_2)^\top \underline{w} = (\underline{v}_1^\top + \underline{v}_2^\top) \underline{w} = \underline{v}_1^\top \underline{w} + \underline{v}_2^\top \underline{w} = \varphi(\underline{v}_1, \underline{w}) + \varphi(\underline{v}_2, \underline{w})$ (linearità nel primo argomento),
- ▶ $\varphi(\alpha \underline{v}, \underline{w}) = (\alpha \underline{v})^\top \underline{w} = \alpha \underline{v}^\top \underline{w} = \alpha \varphi(\underline{v}, \underline{w})$ (omogeneità nel primo argomento),
- ▶ $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \underline{v}^\top \underline{w} = (\underline{v}^\top \underline{w})^\top = \underline{w}^\top \underline{v} = \varphi(\underline{w}, \underline{v})$ (simmetria),
- ▶ poiché φ è simmetrica, φ è lineare e omogenea anche nel secondo argomento, e quindi è una forma bilineare simmetrica, ossia un prodotto scalare su \mathbb{K}^n .

Esempio. Altri esempi di prodotto scalare sono i seguenti:

- ▶ $\varphi(A, B) = \text{tr}(A^\top B)$ per $M(n, \mathbb{K})$,
- ▶ $\varphi(p(x), q(x)) = p(a)q(a)$ per $\mathbb{K}[x]$, con $a \in \mathbb{K}$,
- ▶ $\varphi(p(x), q(x)) = \sum_{i=1}^n p(x_i)q(x_i)$ per $\mathbb{K}[x]$, con x_1, \dots, x_n distinti,
- ▶ $\varphi(p(x), q(x)) = \int_a^b p(x)q(x)dx$ per lo spazio delle funzioni integrabili su \mathbb{R} , con a, b in \mathbb{R} ,
- ▶ $\varphi(\underline{x}, \underline{y}) = \underline{x}^\top A \underline{y}$ per \mathbb{K}^n , con $A \in M(n, \mathbb{K})$ simmetrica, detto anche **prodotto scalare indotto dalla matrice A** , ed indicato con φ_A .

1.1.2 Prodotto definito o semidefinito

Definizione. Sia¹ $\mathbb{K} = \mathbb{R}$. Allora un prodotto scalare φ si dice **definito positivo** ($\varphi > 0$) se $\underline{v} \in V$, $\underline{v} \neq \underline{0} \implies \varphi(\underline{v}, \underline{v}) > 0$. Analogamente φ è **definito negativo** ($\varphi < 0$) se $\underline{v} \neq \underline{0} \implies \varphi(\underline{v}, \underline{v}) < 0$. In generale si dice che φ è **definito** se è definito positivo o definito negativo.

Infine, φ è **semidefinito positivo** ($\varphi \geq 0$) se $\varphi(\underline{v}, \underline{v}) \geq 0 \forall \underline{v} \in V$ (o **semidefinito negativo**, e quindi $\varphi \leq 0$, se invece $\varphi(\underline{v}, \underline{v}) \leq 0 \forall \underline{v} \in V$). Analogamente ai prodotti definiti, si dice che φ è **semidefinito** se è semidefinito positivo o semidefinito negativo.

Esempio. Il prodotto scalare canonico di \mathbb{R}^n è definito positivo: infatti $\varphi((x_1, \dots, x_n), (x_1, \dots, x_n)) = \sum_{i=1}^n x_i^2 > 0$, se $(x_1, \dots, x_n) \neq \underline{0}$.

Al contrario, il prodotto scalare $\varphi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ tale che $\varphi((x_1, x_2), (y_1, y_2)) = x_1 y_1 - x_2 y_2$ non è definito positivo: $\varphi((x, y), (x, y)) = 0$, $\forall (x, y) \mid x^2 = y^2$, ossia se $y = x$ o $y = -x$.

1.2 Il radicale di un prodotto scalare

1.2.1 La forma quadratica q associata a φ e vettori (an)isotropi

Definizione. Ad un dato prodotto scalare φ di V si associa una mappa $q : V \rightarrow \mathbb{K}$, detta **forma quadratica**, tale che $q(\underline{v}) = \varphi(\underline{v}, \underline{v})$.

Osservazione. Si osserva che q non è lineare in generale: infatti $q(\underline{v} + \underline{w}) \neq q(\underline{v}) + q(\underline{w})$ in \mathbb{R}^n .

Definizione (vettore (an)isotropo). Un vettore $\underline{v} \in V$ si dice **isotropo** rispetto al prodotto scalare φ se $q(\underline{v}) = \varphi(\underline{v}, \underline{v}) = 0$. Al contrario, \underline{v} si dice **anisotropo** se non è isotropo, ossia se $q(\underline{v}) \neq 0$.

Definizione (cono isotropo). Si definisce **cono isotropo** di V rispetto al prodotto scalare φ il seguente insieme:

¹In realtà, la definizione è facilmente estendibile a qualsiasi campo, purché esso sia ordinato.

1 Introduzione al prodotto scalare

$$\text{CI}(\varphi) = \{\underline{v} \in V \mid \varphi(\underline{v}, \underline{v}) = 0\},$$

ossia l'insieme dei vettori isotropi di V .

Esempio. Rispetto al prodotto scalare $\varphi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ tale che $\varphi((x_1, x_2, x_3), (y_1, y_2, y_3)) = x_1y_1 + x_2y_2 - x_3y_3$, i vettori isotropi sono i vettori della forma (x, y, z) tali che $x^2 + y^2 = z^2$, e quindi $\text{CI}(\varphi)$ è l'insieme dei vettori stanti sul cono di equazione $x^2 + y^2 = z^2$.

1.2.2 Matrice associata a φ e relazione di congruenza

Osservazione. Come già osservato in generale per le applicazioni multilineari, il prodotto scalare è univocamente determinato dai valori che assume nelle coppie $\underline{v}_i, \underline{v}_j$ estraibili da una base \mathcal{B} . Infatti, se $\mathcal{B} = (\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_k)$, $\underline{v} = \sum_{i=1}^k \alpha_i \underline{v}_i$ e $\underline{w} = \sum_{i=1}^k \beta_i \underline{v}_i$, allora:

$$\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \alpha_i \beta_j \varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j).$$

Definizione. Sia φ un prodotto scalare di V e sia $\mathcal{B} = (\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n)$ una base ordinata di V . Allora si definisce la **matrice associata** a φ come la matrice:

$$M_{\mathcal{B}}(\varphi) = (\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j))_{i,j=1-n} \in M(n, \mathbb{K}).$$

Osservazione.

► $M_{\mathcal{B}}(\varphi)$ è simmetrica, infatti $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi(\underline{v}_j, \underline{v}_i)$, dal momento che il prodotto scalare è simmetrico,

► $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = [\underline{v}]_{\mathcal{B}}^{\top} M_{\mathcal{B}}(\varphi) [\underline{w}]_{\mathcal{B}}$.

Teorema 1.1. (di cambiamento di base per matrici di prodotti scalari) Siano $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ due basi ordinate di V . Allora, se φ è un prodotto scalare di V e $P = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{Id}_V)$, vale la seguente identità:

$$\underbrace{M_{\mathcal{B}'}(\varphi)}_A = P^{\top} \underbrace{M_{\mathcal{B}}(\varphi)}_A P.$$

Dimostrazione. Siano $\mathcal{B} = (\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n)$ e $\mathcal{B}' = (\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_n)$. Allora $A'_{ij} = \varphi(\underline{w}_i, \underline{w}_j) = [\underline{w}_i]_{\mathcal{B}'}^{\top} A [\underline{w}_j]_{\mathcal{B}'} = (P^i)^{\top} A P^j = P_i^{\top} (A P)^j = (P^{\top} A P)_{ij}$, da cui la tesi. \square

Definizione. Si definisce **congruenza** la relazione di equivalenza \cong (denotata anche come \equiv) definita nel seguente modo su $A, B \in M(n, \mathbb{K})$:

$$A \cong B \stackrel{\text{def}}{\iff} \exists P \in GL(n, \mathbb{K}) \mid A = P^{\top} B P.$$

Osservazione. Si può facilmente osservare che la congruenza è in effetti una relazione di equivalenza.

- ▶ $A = I^\top AI \implies A \cong A$ (riflessione),
- ▶ $A \cong B \implies A = P^\top BP \implies B = (P^\top)^{-1}AP^{-1} = (P^{-1})^\top AP^{-1} \implies B \cong A$ (simmetria),
- ▶ $A \cong B, B \cong C \implies A = P^\top BP, B = Q^\top CQ$, quindi $A = P^\top Q^\top CQP = (QP)^\top C(QP) \implies A \cong C$ (transitività).

Osservazione. Si osservano alcune proprietà della congruenza.

- ▶ Per il teorema di cambiamento di base del prodotto scalare, due matrici associate a uno stesso prodotto scalare sono sempre congruenti (esattamente come due matrici associate a uno stesso endomorfismo sono sempre simili).
- ▶ Se A e B sono congruenti, $A = P^\top BP \implies \text{rg}(A) = \text{rg}(P^\top BP) = \text{rg}(BP) = \text{rg}(B)$, dal momento che P e P^\top sono invertibili; quindi il rango è un invariante per congruenza. Allora si può ben definire il rango $\text{rg}(\varphi)$ di un prodotto scalare come il rango della matrice associata di φ in una qualsiasi base di V .
- ▶ Se A e B sono congruenti, $A = P^\top BP \implies \det(A) = \det(P^\top BP) = \det(P^\top) \det(B) \det(P) = \det(P)^2 \det(B)$. Quindi, per $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, il segno del determinante è un altro invariante per congruenza.

1.2.3 Studio del radicale V^\perp attraverso $M_B(\varphi)$

Definizione. Si definisce il **radicale** di un prodotto scalare φ come lo spazio:

$$V^\perp = \text{Rad}(\varphi) = \{\underline{v} \in V \mid \varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0 \forall \underline{w} \in V\}$$

Osservazione. Il radicale del prodotto scalare canonico su \mathbb{R}^n ha dimensione nulla, dal momento che $\forall \underline{v} \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}, q(\underline{v}) = \varphi(\underline{v}, \underline{v}) > 0 \implies \underline{v} \notin V^\perp$. In generale ogni prodotto scalare definito positivo (o negativo) è non degenere, dal momento che ogni vettore non nullo non è isotropo, e dunque non può appartenere a V^\perp .

Definizione. Un prodotto scalare si dice **degenere** se il radicale dello spazio su tale prodotto scalare ha dimensione non nulla.

Osservazione. Sia $\alpha_\varphi : V \rightarrow V^*$ la mappa² tale che $\alpha_\varphi(\underline{v}) = p$, dove $p(\underline{w}) = \varphi(\underline{v}, \underline{w}) \forall \underline{v}, \underline{w} \in V$.

Si osserva che α_φ è un'applicazione lineare. Infatti, $\forall \underline{v}, \underline{w}, \underline{u} \in V, \alpha_\varphi(\underline{v} + \underline{w})(\underline{u}) = \varphi(\underline{v} + \underline{w}, \underline{u}) = \varphi(\underline{v}, \underline{u}) + \varphi(\underline{w}, \underline{u}) = \alpha_\varphi(\underline{v})(\underline{u}) + \alpha_\varphi(\underline{w})(\underline{u}) \implies \alpha_\varphi(\underline{v} + \underline{w}) = \alpha_\varphi(\underline{v}) + \alpha_\varphi(\underline{w})$. Inoltre $\forall \underline{v}, \underline{w} \in V, \lambda \in \mathbb{K}, \alpha_\varphi(\lambda \underline{v})(\underline{w}) = \varphi(\lambda \underline{v}, \underline{w}) = \lambda \varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \lambda \alpha_\varphi(\underline{v})(\underline{w}) \implies \alpha_\varphi(\lambda \underline{v}) = \lambda \alpha_\varphi(\underline{v})$.

Si osserva inoltre che $\text{Ker } \alpha_\varphi$ raccoglie tutti i vettori $\underline{v} \in V$ tali che $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0 \forall \underline{w} \in W$, ossia esattamente i vettori di V^\perp , per cui si conclude che $V^\perp = \text{Ker } \alpha_\varphi$ (per cui V^\perp è effettivamente uno spazio vettoriale). Se V ha dimensione finita, $\dim V = \dim V^*$, e si

²In letteratura questa mappa, se invertibile, è nota come *isomorfismo musicale*, ed è in realtà indicata come \flat .

1 Introduzione al prodotto scalare

può allora concludere che $\dim V^\perp > 0 \iff \text{Ker } \alpha_\varphi \neq \{\underline{0}\} \iff \alpha_\varphi$ non è invertibile (infatti lo spazio di partenza e di arrivo di α_φ hanno la stessa dimensione). In particolare, α_φ non è invertibile se e solo se $\det(\alpha_\varphi) = 0$.

Sia $\mathcal{B} = (\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n)$ una base ordinata di V . Si consideri allora la base ordinata del duale costruita su \mathcal{B} , ossia $\mathcal{B}^* = (\underline{v}_1^*, \dots, \underline{v}_n^*)$. Allora $M_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{B}}(\alpha_\varphi)^i = [\alpha_\varphi(\underline{v}_i)]_{\mathcal{B}^*} = \begin{pmatrix} \varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_1) \\ \vdots \\ \varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_n) \end{pmatrix} \underset{\varphi \text{ è simmetrica}}{=} \begin{pmatrix} \varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_i) \\ \vdots \\ \varphi(\underline{v}_n, \underline{v}_i) \end{pmatrix} = M_{\mathcal{B}}(\varphi)^i$. Quindi $M_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{B}}(\alpha_\varphi) = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$.

Si conclude allora che φ è degenere se e solo se $\det(M_{\mathcal{B}}(\varphi)) = 0$ e che $V^\perp \cong \text{Ker } M_{\mathcal{B}}(\varphi)$ mediante l'isomorfismo del passaggio alle coordinate.

1.2.4 Condizioni per la (semi)definitezza di un prodotto scalare

Proposizione 1.1. Sia $\mathbb{K} = \mathbb{R}$. Allora φ è definito $\iff \text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$.

Dimostrazione. Si dimostrano le due implicazioni separatamente.

(\implies) Se φ è definito, allora $\varphi(\underline{v}, \underline{v})$ è sicuramente diverso da zero se $\underline{v} \neq \underline{0}$. Pertanto $\text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$.

(\impliedby) Sia φ non definito. Se non esistono $\underline{v} \neq \underline{0}, \underline{w} \neq \underline{0} \in V$ tali che $q(\underline{v}) > 0$ e che $q(\underline{w}) < 0$, allora φ è necessariamente semidefinito. In tal caso, poiché φ non è definito, deve anche esistere $\underline{u} \in V, \underline{u} \neq \underline{0} \mid q(\underline{u}) = 0 \implies \text{CI}(\varphi) \neq \{\underline{0}\}$.

Se invece tali $\underline{v}, \underline{w}$ esistono, questi sono anche linearmente indipendenti. Se infatti non lo fossero, uno sarebbe il multiplo dell'altro, e quindi le loro due forme quadratiche sarebbero concordi di segno, \neq . Si consideri allora la combinazione lineare $\underline{v} + \lambda \underline{w}$ al variare di $\lambda \in \mathbb{R}$, imponendo che essa sia isotropa:

$$q(\underline{v} + \lambda \underline{w}) = 0 \iff \lambda^2 q(\underline{w}) + 2\lambda q(\underline{v}, \underline{w}) + q(\underline{v}) = 0.$$

Dal momento che $\frac{\Delta}{4} = \overbrace{q(\underline{v}, \underline{w})^2}^{\geq 0} - \overbrace{q(\underline{w})q(\underline{v})}^{> 0}$ è sicuramente maggiore di zero, tale equazione ammette due soluzioni reali λ_1, λ_2 . In particolare λ_1 è tale che $\underline{v} + \lambda_1 \underline{w} \neq \underline{0}$, dal momento che \underline{v} e \underline{w} sono linearmente indipendenti. Allora $\underline{v} + \lambda_1 \underline{w}$ è un vettore isotropo non nullo di $V \implies \text{CI}(\varphi) \neq \{\underline{0}\}$.

Si conclude allora, tramite la contronominale, che se $\text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$, φ è necessariamente definito. □

Proposizione 1.2. Sia $\mathbb{K} = \mathbb{R}$. Allora φ è semidefinito $\iff \text{CI}(\varphi) = V^\perp$.

Dimostrazione. Si dimostrano le due implicazioni separatamente.

(\implies) Sia φ semidefinito. Chiaramente $V^\perp \subseteq \text{CI}(\varphi)$. Si assuma per assurdo che $V^\perp \subsetneq \text{CI}(\varphi)$. Sia allora \underline{v} tale che $\underline{v} \in \text{CI}(\varphi)$ e che $\underline{v} \notin V^\perp$. Poiché $\underline{v} \notin V^\perp$, esiste un vettore $\underline{w} \in V$ tale che $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) \neq 0$. Si osserva che \underline{v} e \underline{w} sono linearmente indipendenti tra loro. Se infatti non lo fossero, esisterebbe $\mu \in \mathbb{R}$ tale che $\underline{w} = \mu \underline{v} \implies \varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \mu \varphi(\underline{v}, \underline{v}) = 0$, \sharp .

Si consideri allora la combinazione lineare $\underline{v} + \lambda \underline{w}$. Si consideri φ semidefinito positivo. In tal caso si può imporre che la valutazione di q in $\underline{v} + \lambda \underline{w}$ sia strettamente negativa:

$$q(\underline{v} + \lambda \underline{w}) < 0 \iff \overbrace{q(\underline{v})}^{=0} + \lambda^2 q(\underline{w}) + 2\lambda \varphi(\underline{v}, \underline{w}) < 0.$$

In particolare, dal momento che $\frac{\Delta}{4} = \varphi(\underline{v}, \underline{w})^2 > 0$, tale disequazione ammette una soluzione $\lambda_1 \neq 0$. Inoltre $\underline{v} + \lambda_1 \underline{w} \neq \underline{0}$, dal momento che \underline{v} e \underline{w} sono linearmente indipendenti. Allora si è trovato un vettore non nullo per cui la valutazione in esso di q è negativa, contraddicendo l'ipotesi di semidefinitività positiva di φ , \sharp . Analogamente si dimostra la tesi per φ semidefinito negativo.

(\impliedby) Sia φ non semidefinito. Allora devono esistere $\underline{v}, \underline{w} \in V$ tali che $q(\underline{v}) > 0$ e che $q(\underline{w}) < 0$. In particolare, \underline{v} e \underline{w} sono linearmente indipendenti tra loro, dal momento che se non lo fossero, uno sarebbe multiplo dell'altro, e le valutazioni in essi di q sarebbero concordi di segno, \sharp . Si consideri allora la combinazione lineare $\underline{v} + \lambda \underline{w}$, imponendo che q si annulli in essa:

$$q(\underline{v} + \lambda \underline{w}) = 0 \iff \lambda^2 q(\underline{w}) + 2\lambda q(\underline{v}, \underline{w}) + q(\underline{v}) = 0.$$

In particolare, dal momento che $\frac{\Delta}{4} = \varphi(\underline{v}, \underline{w})^2 > 0$, tale disequazione ammette una soluzione $\lambda_1 \neq 0$. Allora, per tale λ_1 , $\underline{v} + \lambda_1 \underline{w} \in \text{CI}(\varphi)$. Tuttavia $\varphi(\underline{v} + \lambda_1 \underline{w}, \underline{v} - \lambda_1 \underline{w}) = q(\underline{v}) - \underbrace{\lambda_1^2 q(\underline{w})}_{<0} > 0 \implies \underline{v} + \lambda_1 \underline{w} \notin V^\perp \implies \text{CI}(\varphi) \not\supseteq V^\perp$.

Si conclude allora, tramite la contronominale, che se $\text{CI}(\varphi) = V^\perp$, φ è necessariamente semidefinito. \square

1.3 Formula delle dimensioni e di polarizzazione rispetto a φ

Definizione (sottospazio ortogonale a W). Sia $W \subseteq V$ un sottospazio di V . Si identifica allora come **sottospazio ortogonale a W** il sottospazio $W^\perp = \{\underline{v} \in V \mid \varphi(\underline{v}, \underline{w}) \forall \underline{w} \in W\}$.

Proposizione 1.3 (formula delle dimensioni del prodotto scalare). Sia $W \subseteq V$ un sottospazio di V . Allora vale la seguente identità:

$$\dim W + \dim W^\perp = \dim V + \dim(W \cap V^\perp).$$

1 Introduzione al prodotto scalare

Dimostrazione. Si consideri l'applicazione lineare a_φ introdotta precedentemente. Si osserva che $W^\perp = \text{Ker}(i^\top \circ a_\varphi)$, dove $i : W \rightarrow V$ è tale che $i(\underline{w}) = \underline{w}$. Allora, per la formula delle dimensioni, vale la seguente identità:

$$\dim V = \dim W^\perp + \text{rg}(i^\top \circ a_\varphi). \quad (1.1)$$

Sia allora $f = i^\top \circ a_\varphi$. Si consideri ora l'applicazione $g = a_\varphi \circ i : W \rightarrow V^*$. Sia ora \mathcal{B}_W una base di W e \mathcal{B}_V una base di V . Allora le matrici associate di f e di g sono le seguenti:

$$(i) \quad M_{\mathcal{B}_W^*}^{\mathcal{B}_V}(f) = M_{\mathcal{B}_W^*}^{\mathcal{B}_V}(i^\top \circ a_\varphi) = \underbrace{M_{\mathcal{B}_W^*}^{\mathcal{B}_V}(i^\top)}_A \underbrace{M_{\mathcal{B}_V^*}^{\mathcal{B}_V}(a_\varphi)}_B = AB,$$

$$(ii) \quad M_{\mathcal{B}_V^*}^{\mathcal{B}_W}(g) = M_{\mathcal{B}_V^*}^{\mathcal{B}_W}(a_\varphi \circ i) = \underbrace{M_{\mathcal{B}_V^*}^{\mathcal{B}_V}(a_\varphi)}_B \underbrace{M_{\mathcal{B}_V^*}^{\mathcal{B}_W}(i)}_{A^\top} = BA^\top \stackrel{B^\top=B}{=} (AB)^\top.$$

Poiché $\text{rg}(A) = \text{rg}(A^\top)$, si deduce che $\text{rg}(f) = \text{rg}(g) \implies \text{rg}(i^\top \circ a_\varphi) = \text{rg}(a_\varphi \circ i) = \text{rg}(a_\varphi|_W) = \dim W - \dim \text{Ker } a_\varphi|_W$, ossia che:

$$\text{rg}(i^\top \circ a_\varphi) = \dim W - \underbrace{\dim(W \cap \text{Ker } a_\varphi)}_{V^\perp} = \dim W - \dim(W \cap V^\perp). \quad (1.2)$$

Si conclude allora, sostituendo l'equazione (1.2) nell'equazione (1.1), che $\dim V = \dim W^\perp + \dim W - \dim(W \cap V^\perp)$, ossia la tesi. \square

Dimostrazione alternativa. Si consideri nuovamente l'applicazione lineare α_φ introdotta precedentemente. Si osserva innanzitutto che³ $W^\perp = \alpha_\varphi^{-1}(\text{Ann}(W))$. Allora vale la seguente identità:

$$\alpha_\varphi(W^\perp) = \text{Ann}(W) \cap \text{Im } \alpha_\varphi. \quad (1.3)$$

Si mostra che $\text{Im } \alpha_\varphi = \text{Ann}(V^\perp)$. Chiaramente $\text{Im } \alpha_\varphi \subseteq \text{Ann}(V^\perp)$: siano infatti $\underline{v} \in V$ e $\underline{w} \in V^\perp$, allora $\alpha_\varphi(\underline{v})(\underline{w}) = \varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0$. Inoltre $\dim \text{Im } \alpha_\varphi = \text{rg } \alpha_\varphi = n - \dim \text{Ker } \alpha_\varphi = \dim V - \dim V^\perp = \dim \text{Ann}(V^\perp)$, da cui segue l'uguaglianza dei due sottospazi. Allora l'equazione (1.3) si può riscrivere⁴ come:

$$\alpha_\varphi(W^\perp) = \text{Ann}(W) \cap \text{Ann}(V^\perp) = \text{Ann}(W + V^\perp)$$

da cui segue che:

$$\dim W^\perp - \dim(V^\perp \cap W^\perp) = \dim V - \dim(W + V^\perp),$$

³ α_φ^{-1} in questo caso non indica un'eventuale applicazione inversa di α_φ , ma indica l'insieme delle eventuali controimmagini degli elementi su cui è applicata.

⁴Si è utilizzata l'identità $\text{Ann}(U) \cap \text{Ann}(W) = \text{Ann}(U + W)$, dove U e W sono due sottospazi di V , nonché che $\text{Ker } \alpha_\varphi = V^\perp$.

e quindi, applicando la formula di Grassmann, che⁵:

$$\dim W^\perp - \dim V^\perp = \dim V - \dim W - \dim V^\perp + \dim(W \cap V^\perp),$$

ossia la tesi. □

Osservazione. Si identifica \underline{w}^\perp come il sottospazio di tutti i vettori di V ortogonali a \underline{w} . In particolare, se $W = \text{Span}(\underline{w})$ è il sottospazio generato da $\underline{w} \neq \underline{0}$, $\underline{w} \in V$, allora $W^\perp = \underline{w}^\perp$. Inoltre valgono le seguenti equivalenze: $\underline{w} \notin W^\perp \iff \text{Rad}(\varphi|_W) = W \cap W^\perp = \{\underline{0}\} \iff \underline{w}$ non è isotropo $\iff V = W \oplus^\perp W^\perp$.

In generale, se W è un sottospazio qualsiasi di V tale che $W \cap W^\perp = \{\underline{0}\}$, vale che $V = W \oplus^\perp W^\perp$.

Proposizione 1.4 (formula di polarizzazione). Se $\text{char } \mathbb{K} \neq 2$, un prodotto scalare è univocamente determinato dalla sua forma quadratica q . In particolare vale la seguente identità:

$$\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \frac{q(\underline{v} + \underline{w}) - q(\underline{v}) - q(\underline{w})}{2}.$$

1.4 Il teorema di Lagrange e basi ortogonali

Definizione. Si definisce **base ortogonale** di V una base $\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n$ tale per cui $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = 0 \iff i \neq j$, ossia una base per cui la matrice associata del prodotto scalare è diagonale.

Teorema 1.2 (di Lagrange). Ogni spazio vettoriale V su \mathbb{K} tale per cui $\text{char } \mathbb{K} \neq 2$ ammette una base ortogonale.

Dimostrazione. Si dimostra il teorema per induzione su $n := \dim V$. Per $n \leq 1$, la tesi è triviale (se esiste una base, tale base è già ortogonale). Sia allora il teorema vero per $i \leq n$. Se V ammette un vettore non isotropo \underline{w} , sia $W = \text{Span}(\underline{w})$ e si consideri la decomposizione $V = W \oplus W^\perp$. Poiché W^\perp ha dimensione $n - 1$, per ipotesi induttiva ammette una base ortogonale. Inoltre, tale base è anche ortogonale a W , e quindi l'aggiunta di \underline{w} a questa base ne fa una base ortogonale di V . Se invece V non ammette vettori non isotropi, ogni forma quadratica è nulla, e quindi il prodotto scalare è nullo per la *formula di polarizzazione*. Allora in questo caso ogni base è una base ortogonale, completando il passo induttivo, e dunque la dimostrazione. □

1.4.1 L'algoritmo di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt

Definizione (coefficiente di Fourier). Siano $\underline{v} \in V$ e $\underline{w} \in V \setminus \text{CI}(\varphi)$. Allora si definisce il **coefficiente di Fourier** di \underline{v} rispetto a \underline{w} come il rapporto $C(\underline{w}, \underline{v}) = \frac{\varphi(\underline{v}, \underline{w})}{\varphi(\underline{w}, \underline{w})}$.

⁵Ricordiamo che $V^\perp \subseteq W^\perp$ per ogni sottospazio W di V , e quindi che $\dim(V^\perp \cap W^\perp) = \dim V^\perp$.

Algoritmo 1.1 (algoritmo di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt). Se $\text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$ (e quindi nel caso di $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, dalla *Proposizione 1.1*, se φ è definito) ed è data una base $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ per V , è possibile applicare l'**algoritmo di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt** per ottenere da \mathcal{B} una nuova base $\mathcal{B}' = \{\underline{v}'_1, \dots, \underline{v}'_n\}$ con le seguenti proprietà:

- (i) \mathcal{B}' è una base ortogonale,
- (ii) \mathcal{B}' mantiene la stessa bandiera di \mathcal{B} (ossia $\text{Span}(\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_i) = \text{Span}(\underline{v}'_1, \dots, \underline{v}'_i)$ per ogni $1 \leq i \leq n$).

L'algoritmo si applica nel seguente modo: si prenda in considerazione \underline{v}_1 e si sottragga ad ogni altro vettore della base il vettore $C(\underline{v}_1, \underline{v}_i) \underline{v}_1 = \frac{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_i)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)} \underline{v}_1$, rendendo ortogonale ogni altro vettore della base con \underline{v}_1 . Si sta quindi applicando la mappa $\underline{v}_i \mapsto \underline{v}_i - \frac{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_i)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)} \underline{v}_1 = \underline{v}_i^{(1)}$. Si verifica infatti che \underline{v}_1 e $\underline{v}_i^{(1)}$ sono ortogonali per $2 \leq i \leq n$:

$$\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_i^{(1)}) = \varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_i) - \varphi\left(\underline{v}_1, \frac{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_i)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)} \underline{v}_1\right) = \varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_i) - \varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_i) = 0.$$

Poiché \underline{v}_1 non è isotropo, si deduce che vale la decomposizione $V = \text{Span}(\underline{v}_1) \oplus \text{Span}(\underline{v}_1)^\perp$. In particolare $\dim \text{Span}(\underline{v}_1)^\perp = n - 1$: essendo allora i vettori $\underline{v}_2^{(1)}, \dots, \underline{v}_n^{(1)}$ linearmente indipendenti e appartenenti a $\text{Span}(\underline{v}_1)^\perp$, ne sono una base. Si conclude quindi che vale la seguente decomposizione:

$$V = \text{Span}(\underline{v}_1) \oplus^\perp \text{Span}(\underline{v}_2^{(1)}, \dots, \underline{v}_n^{(1)}).$$

Si riapplica dunque l'algoritmo di Gram-Schmidt prendendo come spazio vettoriale lo spazio generato dai vettori a cui si è applicato precedentemente l'algoritmo, ossia $V' = \text{Span}(\underline{v}_2^{(1)}, \dots, \underline{v}_n^{(1)})$, fino a che non si ottiene $V' = \{\underline{0}\}$.

Esempio. Si consideri $V = (\mathbb{R}^3, \langle \cdot, \cdot \rangle)$, ossia \mathbb{R}^3 dotato del prodotto scalare standard. Si applica l'algoritmo di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt sulla seguente base:

$$\mathcal{B} = \left\{ \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\underline{v}_1 = \underline{e}_1}, \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\underline{v}_2}, \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}}_{\underline{v}_3} \right\}.$$

Alla prima iterazione dell'algoritmo si ottengono i seguenti vettori:

$$\bullet \underline{v}_2^{(1)} = \underline{v}_2 - \frac{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_2)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)} \underline{v}_1 = \underline{v}_2 - \underline{v}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \underline{e}_2,$$

$$\bullet \underline{v}_3^{(1)} = \underline{v}_3 - \frac{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_3)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)} \underline{v}_1 = \underline{v}_3 - \underline{v}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Si considera ora $V' = \text{Span}(\underline{v}_2^{(1)}, \underline{v}_3^{(1)})$. Alla seconda iterazione dell'algoritmo si ottiene allora il seguente vettore:

$$\bullet \underline{v}_3^{(2)} = \underline{v}_3^{(1)} - \frac{\varphi(\underline{v}_2^{(1)}, \underline{v}_3^{(1)})}{\varphi(\underline{v}_2^{(1)}, \underline{v}_2^{(1)})} \underline{v}_2^{(1)} = \underline{v}_3^{(1)} - \underline{v}_2^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \underline{e}_3.$$

Quindi la base ottenuta è $\mathcal{B}' = \{\underline{e}_1, \underline{e}_2, \underline{e}_3\}$, ossia la base canonica di \mathbb{R}^3 .

1.5 Il teorema di Sylvester

1.5.1 Caso complesso

Nota. D'ora in poi, nel corso del documento, si assumerà $\text{char } \mathbb{K} \neq 2$.

Teorema 1.3 (di Sylvester, caso complesso). Sia \mathbb{K} un campo i cui elementi sono tutti quadrati di un altro elemento del campo (e.g. \mathbb{C}). Allora esiste una base ortogonale \mathcal{B} tale per cui:

$$M_{\mathcal{B}}(\varphi) = \left(\begin{array}{c|c} I_r & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right).$$

Dimostrazione. Per il teorema di Lagrange, esiste una base ortogonale \mathcal{B}' di V . Si riordini allora la base \mathcal{B}' in modo tale che la forma quadratica valutata nei primi elementi sia sempre diversa da zero. Allora, poiché ogni elemento di \mathbb{K} è per ipotesi quadrato di un altro elemento di \mathbb{K} , si sostituisca \mathcal{B}' con una base \mathcal{B} tale per cui, se $q(\underline{v}_i) = 0$, $\underline{v}_i \mapsto \underline{v}_i$, e altrimenti $\underline{v}_i \mapsto \frac{\underline{v}_i}{\sqrt{q(\underline{v}_i)}}$. Allora \mathcal{B} è una base tale per cui la matrice associata del prodotto scalare in tale base è proprio come desiderata nella tesi, dove r è il numero di elementi tali per cui la forma quadratica valutata in essi sia diversa da zero. \square

Osservazione.

► Si può immediatamente concludere che il rango è un invariante completo per la congruenza in un campo \mathbb{K} in cui tutti gli elementi sono quadrati, ossia che $A \cong B \iff \text{rg}(A) = \text{rg}(B)$, se A e B sono matrici simmetriche con elementi in \mathbb{K} .

Ogni matrice simmetrica rappresenta infatti un prodotto scalare, ed è pertanto congruente ad una matrice della forma desiderata nell'enunciato del teorema di Sylvester complesso. Poiché il rango è un invariante della congruenza, si ricava che r nella forma della matrice di Sylvester, rappresentando il rango, è anche il rango di ogni sua matrice

congruente.

In particolare, se due matrici simmetriche hanno lo stesso rango, allora sono congruenti alla stessa matrice di Sylvester, e quindi, essendo la congruenza una relazione di equivalenza, sono congruenti a loro volta tra di loro.

► Due matrici simmetriche in \mathbb{K} con stesso rango, allora, non solo sono SD-equivalenti, ma sono anche congruenti.

► Ogni base ortogonale deve quindi avere lo stesso numero di vettori isotropi, dal momento che tale numero rappresenta la dimensione del radicale V^\perp .

1.5.2 Caso reale e segnatura di φ

Definizione (segnatura di un prodotto scalare). Data una base ortogonale \mathcal{B} di V rispetto al prodotto scalare φ , si definiscono i seguenti indici:

$$\begin{aligned} \iota_+(\varphi) &= \max\{\dim W \mid W \subseteq V \text{ e } \varphi|_W > 0\}, & (\text{indice di positività}) \\ \iota_-(\varphi) &= \max\{\dim W \mid W \subseteq V \text{ e } \varphi|_W < 0\}, & (\text{indice di negatività}) \\ \iota_0(\varphi) &= \dim V^\perp. & (\text{indice di nullità}) \end{aligned}$$

Quando il prodotto scalare φ è noto dal contesto, si semplifica la notazione scrivendo solo ι_+ , ι_- e ι_0 . In particolare, la terna $\sigma(\varphi) = \sigma = (i_+, i_-, i_0)$ è detta **segnatura** del prodotto φ .

Teorema 1.4 (di Sylvester, caso reale). Sia \mathbb{K} un campo ordinato i cui elementi positivi sono tutti quadrati (e.g. \mathbb{R}). Allora esiste una base ortogonale \mathcal{B} tale per cui:

$$M_{\mathcal{B}}(\varphi) = \left(\begin{array}{c|c|c} I_{\iota_+} & 0 & 0 \\ \hline 0 & -I_{\iota_-} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \cdot I_{\iota_0} \end{array} \right).$$

Inoltre, per ogni base ortogonale, esistono esattamente ι_+ vettori della base con forma quadratica positiva, ι_- con forma negativa e ι_0 con forma nulla.

Dimostrazione. Per il teorema di Lagrange, esiste una base ortogonale \mathcal{B}' di V . Si riordini la base in modo tale che la forma quadratica valutata nei primi elementi sia strettamente positiva, che nei secondi elementi sia strettamente negativa e che negli ultimi sia nulla. Si sostituisca \mathcal{B}' con una base \mathcal{B} tale per cui, se $q(\underline{v}_i) > 0$, allora $\underline{v}_i \mapsto \frac{\underline{v}_i}{\sqrt{q(\underline{v}_i)}}$; se $q(\underline{v}_i) < 0$, allora $\underline{v}_i \mapsto \frac{\underline{v}_i}{\sqrt{-q(\underline{v}_i)}}$; altrimenti $\underline{v}_i \mapsto \underline{v}_i$. Si è allora trovata una base la cui matrice associata del prodotto scalare è come desiderata nella tesi.

Sia ora \mathcal{B} una qualsiasi base ortogonale di V . Siano inoltre a il numero di vettori della base con forma quadratica positiva, b il numero di vettori con forma negativa e c quello

1 Introduzione al prodotto scalare

dei vettori con forma nulla. Si consideri $W_+ = \text{Span}(\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_a)$, $W_- = \text{Span}(\underline{v}_{a+1}, \dots, \underline{v}_b)$, $W_0 = \text{Span}(\underline{v}_{b+1}, \dots, \underline{v}_c)$.

Sia $M = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$. Si osserva che $c = n - \text{rg}(M) = \dim \text{Ker}(M) = \dim V^\perp = \iota_0$. Inoltre $\forall \underline{v} \in W_+$, dacché \mathcal{B} è ortogonale, $q(\underline{v}) = q(\sum_{i=1}^a \alpha_i \underline{v}_i) = \sum_{i=1}^a \alpha_i^2 q(\underline{v}_i) > 0$, e quindi $\varphi|_{W_+} > 0$, da cui $\iota_+ \geq a$. Analogamente $\iota_- \geq b$.

Si mostra ora che è impossibile che $\iota_+ > a$. Se così infatti fosse, sia W tale che $\dim W = \iota_+$ e che $\varphi|_W > 0$. $\iota_+ + b + c$ sarebbe maggiore di $a + b + c = n := \dim V$. Quindi, per la formula di Grassman, $\dim(W + W_- + W_0) = \dim W + \dim(W_- + W_0) - \dim(W \cap (W_- + W_0)) \implies \dim(W \cap (W_- + W_0)) = \dim W + \dim(W_- + W_0) - \dim(W + W_- + W_0) > 0$, ossia esisterebbe $\underline{v} \neq \underline{0} \mid \underline{v} \in W \cap (W_- + W_0)$. Tuttavia questo è assurdo, dacché dovrebbe valere sia $q(\underline{v}) > 0$ che $q(\underline{v}) < 0$, \neq . Quindi $\iota_+ = a$, e analogamente $\iota_- = b$. \square

Definizione. Si dice **base di Sylvester** una base di V tale per cui la matrice associata di φ sia esattamente nella forma vista nell'enunciato del teorema di Sylvester. Analogamente si definisce tale matrice come **matrice di Sylvester**.

Osservazione.

► Come conseguenza del teorema di Sylvester reale, si osserva che la segnatura di una matrice simmetrica reale è invariante per cambiamento di base, se la base è ortogonale.

► La segnatura è un invariante completo per la congruenza nel caso reale. Se infatti due matrici hanno la stessa segnatura, queste sono entrambe congruenti alla stessa matrice di Sylvester, e quindi, essendo la congruenza una relazione di equivalenza, sono congruenti tra loro. Analogamente vale il viceversa, dal momento che ogni base ortogonale di due matrici congruenti deve contenere gli stessi numeri ι_+ , ι_- e ι_0 di vettori di base con forma quadratica positiva, negativa e nulla.

► Vale che φ è definito positivo $\iff \sigma = (n, 0, 0)$. Infatti, per il teorema di Sylvester reale, $i_+ = n \iff$ la dimensione del massimo sottospazio di V su cui φ è definito positivo è $n \iff \varphi$ è definito positivo. Analogamente φ è definito negativo $\iff \sigma = (0, n, 0)$.

► Nello stesso spirito dei prodotti definiti, φ è semidefinito positivo $\iff \iota_- = 0$. Infatti valgono le seguenti equivalenze: φ è semidefinito positivo \iff non esiste un vettore $\underline{v} \in V$, $\underline{v} \neq \underline{0}$ tale che $q(\underline{v}) < 0 \iff \iota_- = 0$. Analogamente φ è semidefinito negativo $\iff \iota_+ = 0$.

► Se $\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_k$ sono tutti i vettori di una base ortogonale \mathcal{B} con forma quadratica nulla, si osserva che $W = \text{Span}(\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_k)$ altro non è che V^\perp stesso.

Infatti, come visto anche nella dimostrazione del teorema di Sylvester reale, vale che $\dim W = \dim \text{Ker}(M_{\mathcal{B}}(\varphi)) = \dim V^\perp$. Sia allora la base $\mathcal{B} = \{\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_k, \underline{v}_{k+1}, \dots, \underline{v}_n\}$

1 Introduzione al prodotto scalare

un'estensione di $\{\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_k\}$. Se $\underline{w} \in W$ e $\underline{v} \in V$, $\varphi(\underline{w}, \underline{v}) = \varphi(\sum_{i=1}^k \alpha_i \underline{w}_i, \sum_{i=1}^k \beta_i \underline{w}_i + \sum_{i=k+1}^n \beta_i \underline{v}_i) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \beta_i q(\underline{w}_i) = 0$ (dove α_i e $\beta_i \in \mathbb{K}$ rappresentano la i -esima coordinata di \underline{w} e \underline{v} nella base \mathcal{B}), e quindi $W \subseteq V^\perp$. Si conclude allora, tramite l'uguaglianza dimensionale, che $W = V^\perp$.

► Poiché $\dim \text{Ker}(\varphi) = \iota_0$, vale in particolare che $\text{rg}(\varphi) = n - \iota_0 = \iota_+ + \iota_-$ (infatti vale che $n = \iota_+ + \iota_- + \iota_0$, dal momento che n rappresenta il numero di elementi di una base ortogonale).

► Se $V = U \oplus^\perp W$, allora $\iota_+(\varphi) = \iota_+(\varphi|_U) + \iota_+(\varphi|_W)$. Analogamente vale la stessa cosa per gli altri indici. Infatti, prese due basi ortogonali $\mathcal{B}_U, \mathcal{B}_W$ di U e W , la loro unione \mathcal{B} è una base ortogonale di V . Pertanto il numero di vettori della base \mathcal{B} con forma quadratica positiva è esattamente $\iota_+(\varphi|_U) + \iota_+(\varphi|_W)$.

► In generale, se W è un sottospazio di V , vale che $\iota_+(\varphi) \geq \iota_+(\varphi|_W)$. Infatti, se U è un sottospazio di W di dimensione $\iota_+(\varphi|_W)$ tale che $(\varphi|_W)|_U > 0$, allora U è in particolare un sottospazio di V tale che $\varphi|_U > 0$. Pertanto, per definizione, essendo $\iota_+(\varphi)$ la dimensione del massimo sottospazio su cui φ , ristretto ad esso, è definito positivo, deve valere che $\iota_+(\varphi) \geq \iota_+(\varphi|_W)$. Analogamente, $\iota_-(\varphi) \geq \iota_-(\varphi|_W)$.

1.5.2.1 Classificazione delle segnature per $n = 1, 2, 3$

Sia \mathcal{B} una base di Sylvester per φ . Sia $A = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$. Si indica con x, y e z le tre coordinate di $\underline{v} \in V$ secondo la base \mathcal{B} .

($n = 1$) Vi sono solo tre possibili matrici per A :

- $A = (0)$, con $\sigma = (0, 0, 1)$, $\text{rg}(\varphi) = 0$ e $\text{CI}(\varphi) = V$,
- $A = (1)$, con $\sigma = (1, 0, 0)$, $\text{rg}(\varphi) = 1$ e $\text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$,
- $A = (-1)$, con $\sigma = (0, 1, 0)$, $\text{rg}(\varphi) = 1$ e $\text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$.

($n = 2$) Vi sono sei possibili matrici per A :

- $A = 0$, con $\sigma = (0, 0, 2)$, $\text{rg}(\varphi) = 0$ e $\text{CI}(\varphi) = V$,
- $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, con $\sigma = (1, 0, 1)$, $\text{rg}(\varphi) = 1$ e $\text{CI}(\varphi) = \{x = 0 \mid \underline{v} \in V\} = V^\perp$,
- $A = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, con $\sigma = (0, 1, 1)$, $\text{rg}(\varphi) = 1$ e $\text{CI}(\varphi) = \{x = 0 \mid \underline{v} \in V\} = V^\perp$,
- $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, con $\sigma = (1, 1, 0)$, $\text{rg}(\varphi) = 2$ e $\text{CI}(\varphi) = \{x^2 = y^2 \mid \underline{v} \in V\}$,

1 Introduzione al prodotto scalare

- $A = I_2$, con $\sigma = (2, 0, 0)$, $\text{rg}(\varphi) = 2$ e $\text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$,
- $A = -I_2$, con $\sigma = (0, 2, 0)$, $\text{rg}(\varphi) = 2$ e $\text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$.

Si osserva in particolare che $\det(A) = -1 \iff \sigma = (1, 1, 0)$. Pertanto se M è una matrice associata al prodotto scalare φ in una base \mathcal{B}' , $\det(M) < 0 \iff \sigma = (1, 1, 0)$.

($n = 3$) Se A contiene almeno uno zero nella diagonale, si può studiare A riconducendosi al caso $n = 2$, considerando la matrice $A_{1,2}^{1,2}$, e incrementando di uno l'indice di nullità di φ (eventualmente considerando anche come varia il cono isotropo). Altrimenti A può essere rappresentato dalle seguenti quattro matrici:

- $A = I_3$, con $\sigma = (3, 0, 0)$, $\text{rg}(\varphi) = 3$ e $\text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$,
- $A = -I_3$, con $\sigma = (0, 3, 0)$, $\text{rg}(\varphi) = 3$ e $\text{CI}(\varphi) = \{\underline{0}\}$,
- $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$, con $\sigma = (2, 1, 0)$, $\text{rg}(\varphi) = 3$ e $\text{CI}(\varphi) = \{x^2 + y^2 = z^2 \mid \underline{v} \in V\}$,
- $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$, con $\sigma = (1, 2, 0)$, $\text{rg}(\varphi) = 3$ e $\text{CI}(\varphi) = \{y^2 + z^2 = x^2 \mid \underline{v} \in V\}$.

Si osserva infine che, se $V = \mathbb{R}^3$ e \mathcal{B} ne è la base canonica, i coni isotropi delle ultime due matrici rappresentano proprio due coni nello spazio tridimensionale.

1.5.2.2 Metodo di Jacobi per il calcolo della segnatura

Proposizione 1.5. Sia \mathbb{K} un campo ordinato i cui elementi positivi sono tutti quadrati (e.g. \mathbb{R}). Sia W un sottospazio di V di dimensione k . Sia W' un sottospazio di V di dimensione $k + 1$. Sia $\sigma(\varphi|_W) = (p, q, 0)$, con $p, q \in \mathbb{N}$ e siano \mathcal{B} e \mathcal{B}' due basi di W e W' . Siano $B = M_{\mathcal{B}}(\varphi|_W)$ e $B' = M_{\mathcal{B}'}(\varphi|_W)$.

Sia $d := \frac{\det(B')}{\det(B)}$. Allora vale che:

$$\sigma(\varphi|_{W'}) = \begin{cases} (p + 1, q, 0) & \text{se } d > 0, \\ (p, q + 1, 0) & \text{se } d < 0, \\ (p, q, 1) & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

Dimostrazione. Dalle precedenti osservazioni, vale che $\iota_+(\varphi|_{W'}) \geq \iota_+(\varphi|_W)$ e che $\iota_-(\varphi|_{W'}) \geq \iota_-(\varphi|_W)$. Inoltre $\varphi|_W$ è non degenero dal momento che $\iota_0(\varphi|_W) = 0$, e

pertanto $p + q = \text{rg}(\varphi|_W) = k$.

Siano ora \mathcal{B}_\perp e \mathcal{B}'_\perp due basi di Sylvester di W e W' . Siano $A = M_{\mathcal{B}_\perp}(\varphi|_W)$ e $A' = M_{\mathcal{B}'_\perp}(\varphi|_W)$. Allora $\det(A) = (-1)^p(-1)^q$, mentre $\det(A') = (-1)^p(-1)^q d'$, dove $d' \in \{-1, 0, 1\}$. Allora $\det(A') = \det(A)d' \implies d' = \frac{\det(A')}{\det(A)}$, dal momento che $\det(A) \neq 0$, essendo $\varphi|_W$ non degenerare.

In particolare, $\sigma(\varphi|_{W'}) = (p, q, 1)$ se e solo se $\det(A') = 0 \implies d' = 0$. Dal momento che $\det(A') = 0 \iff \det(B') = 0$, $d' = 0 \iff d = 0$. Pertanto si conclude che $\sigma(\varphi|_{W'}) = (p, q, 1) \iff d = 0$.

Al contrario, $\sigma(\varphi|_{W'}) = (p + 1, q, 0)$ se e solo se $d' = 1$, ossia se e solo se $\det(A')$ e $\det(A)$ sono concordi di segno. Dal momento che il segno è un invariante del cambiamento di base per la matrice associata a φ , $d' = 1$ se e solo se $\det(B)$ e $\det(B')$ sono concordi di segno, ossia se e solo se $d > 0$. Pertanto $\sigma(\varphi|_{W'}) = (p + 1, q, 0) \iff d > 0$. Analogamente si verifica che $\sigma(\varphi|_{W'}) = (p, q + 1, 0) \iff d < 0$, da cui la tesi. \square

Algoritmo 1.2 (metodo di Jacobi). Sia \mathcal{B} una base di V e sia $A = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$. Se il determinante di ogni minore di testa⁶ di A (ossia dei minori della forma $A_{1, \dots, i}^{1, \dots, i}$, con $1 \leq i \leq n - 1$) è diverso da zero, è possibile applicare il **metodo di Jacobi** per il calcolo della segnatura di φ .

Sia $d_i = \det \left(A_{1, \dots, i}^{1, \dots, i} \right) \forall 1 \leq i \leq n$ e si ponga $d_0 := 1$. Allora, per la *Proposizione 1.5*, ι_+ corrisponde al numero di permanenze del segno tra elementi consecutivi (escludendo 0) di (d_i) , mentre ι_- corrisponde al numero di variazioni del segno (anche stavolta escludendo 0). Infine ι_0 può valere solo 0 o 1, dove $\iota_0 = 1 \iff \det(A) = 0$.

Esempio. Sia $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 4 \end{pmatrix} \in M(3, \mathbb{R})$.

Si calcola la segnatura di φ_A mediante il metodo di Jacobi. Poiché A è la matrice associata di φ_A nella base canonica di \mathbb{R}^3 , si può applicare il metodo di Jacobi direttamente su A .

Si calcola allora la successione dei d_i :

1. $d_1 = \det(1) = 1$,
2. $d_2 = \det \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} = 2 - 1 = 1$,

⁶In realtà il metodo si estende ad ogni successione di minori coerente con un'estensione di base (i.e. i minori principali di A).

3. $d_3 = \det(A) = (8 - 1) - 4 = 3$.

Dal momento che vi sono tre permanenze di segno, si conclude che $\sigma(\varphi_A) = (3, 0, 0)$, ossia che φ_A è definito positivo.

1.5.2.3 Criterio di Sylvester per la definitezza di un prodotto scalare

Proposizione 1.6 (criterio di Sylvester per i prodotti definiti). Sia $\mathbb{K} = \mathbb{R}$. Sia \mathcal{B} una base di V , e sia $A = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$. Sia $d_i = \det \begin{pmatrix} A_{1,\dots,i}^{1,\dots,i} \end{pmatrix}$. Allora φ è definito positivo se e solo se $d_i > 0 \forall 1 \leq i \leq n$. Analogamente φ è definito negativo se e solo se $(-1)^i d_i > 0 \forall 1 \leq i \leq n$.

Dimostrazione. Si osserva che φ è definito positivo se e solo se $\iota_+ = n$. Pertanto, per il *metodo di Jacobi*, φ è definito positivo se e solo se vi sono solo permanenze di segno tra elementi consecutivi nella successione (d_i) , e quindi se e solo se $d_i > 0 \forall 1 \leq i \leq n$. Analogamente φ è definito negativo se e solo se $\iota_- = n$, e quindi se e solo se vi sono solo variazioni di segno $\iff d_i > 0$ se i è pari e $d_i < 0$ se i è dispari $\iff (-1)^i d_i > 0, \forall 1 \leq i \leq n$. \square

1.5.2.4 Sottospazi isotropi e indice di Witt

Definizione (sottospazio isotropo). Sia W un sottospazio di V . Allora si dice che W è un **sottospazio isotropo** di V se $\varphi|_W = 0$.

Osservazione.

- ▶ V^\perp è un sottospazio isotropo di V .
- ▶ \underline{v} è un vettore isotropo $\iff W = \text{Span}(\underline{v})$ è un sottospazio isotropo di V .
- ▶ $W \subseteq V$ è isotropo $\iff W \subseteq W^\perp$.

Proposizione 1.7. Sia φ non degenere. Se W è un sottospazio isotropo di V , allora $\dim W \leq \frac{1}{2} \dim V$.

Dimostrazione. Poiché W è un sottospazio isotropo di V , vale che $W \subseteq W^\perp$. Allora vale che:

$$\dim W \leq \dim W^\perp. \tag{1.4}$$

Inoltre, dal momento che φ è non degenere, vale anche che:

$$\dim W + \dim W^\perp = \dim V \implies \dim W^\perp = \dim V - \dim W. \tag{1.5}$$

Sostituendo allora l'equazione (1.5) nella disuguaglianza (1.4), si ottiene che $\dim W \leq \frac{1}{2} \dim V$, ossia la tesi. \square

Definizione (indice di Witt). Si definisce l'**indice di Witt** $W(\varphi)$ di (V, φ) come la massima dimensione di un sottospazio isotropo di V .

Osservazione.

► Se $\varphi > 0$ o $\varphi < 0$, $W(\varphi) = 0$. Infatti ogni sottospazio non nullo W di V non ammette vettori isotropi, da cui si deduce che $\varphi|_W \neq 0$.

► Se φ è non degenere, per la *Proposizione 1.7*, vale che $W(\varphi) \leq \frac{1}{2} \dim V$.

Proposizione 1.8. Sia $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ e sia φ non degenere. Allora $W(\varphi) = \min\{\iota_+(\varphi), \iota_-(\varphi)\}$.

Dimostrazione. Senza perdita di generalità si assuma $\iota_-(\varphi) \leq \iota_+(\varphi)$ (il caso $\iota_-(\varphi) > \iota_+(\varphi)$ è analogo). Sia W un sottospazio con $\dim W > \iota_-(\varphi)$. Sia W^+ un sottospazio con $\dim W^+ = \iota_+(\varphi)$ e $\varphi|_{W^+} > 0$. Allora, per la formula di Grassmann, $n \geq \dim(W+W^+) = \dim W + \dim W^+ - \dim(W \cap W^+) > n - \dim(W \cap W^+) \implies \dim(W \cap W^+) > 0$. Quindi $\exists \underline{w} \in W$, $\underline{w} \neq \underline{0}$ tale che $\varphi(\underline{w}, \underline{w}) > 0$, da cui si ricava che W non è isotropo. Pertanto $W(\varphi) \leq \iota_-(\varphi)$.

Sia $a := \iota_+(\varphi)$ e sia $b := \iota_-(\varphi)$. Sia ora $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_a, \underline{w}_1, \dots, \underline{w}_b\}$ una base di Sylvester per φ . Siano $\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_a$ tali che $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_i) = 1$ con $1 \leq i \leq a$. Analogamente siano $\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_b$ tali che $\varphi(\underline{w}_i, \underline{w}_i) = -1$ con $1 \leq i \leq b$. Detta allora $\mathcal{B}' = \{\underline{v}'_1 := \underline{v}_1 + \underline{w}_1, \dots, \underline{v}'_b := \underline{v}_b + \underline{w}_b\}$, sia $W = \text{Span}(\mathcal{B}')$.

Si osserva che \mathcal{B}' è linearmente indipendente, e dunque che $\dim W = \iota_-$. Inoltre $\varphi(\underline{v}'_i, \underline{v}'_j) = \varphi(\underline{v}_i + \underline{w}_i, \underline{v}_j + \underline{w}_j)$. Se $i \neq j$, allora $\varphi(\underline{v}'_i, \underline{v}'_j) = 0$, dal momento che i vettori di \mathcal{B} sono a due a due ortogonali tra loro. Se invece $i = j$, allora $\varphi(\underline{v}'_i, \underline{v}'_i) = \varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_i) + \varphi(\underline{w}_i, \underline{w}_i) = 1 - 1 = 0$. Quindi $M_{\mathcal{B}'}(\varphi|_W) = 0$, da cui si conclude che $\varphi|_W = 0$. Pertanto $W(\varphi) \geq \iota_-(\varphi)$, e quindi si conclude che $W(\varphi) = \iota_-(\varphi)$, da cui la tesi. \square

1.6 Isometrie tra spazi vettoriali

Definizione. (isometria) Dati due spazi vettoriali (V, φ) e (V', φ') dotati di prodotto scalare sullo stesso campo \mathbb{K} , si dice che V e V' sono **isometrici** se esiste un isomorfismo f , detto *isometria*, che preserva tali che prodotti, ossia tale che:

$$\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \varphi'(f(\underline{v}), f(\underline{w})).$$

Esercizio 1. Sia $f : V \rightarrow V'$ un isomorfismo. Allora f è un'isometria $\iff \forall$ base $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ di V , $\mathcal{B}' = \{f(\underline{v}_1), \dots, f(\underline{v}_n)\}$ è una base di V' e $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) \forall 1 \leq i, j \leq n \iff \exists$ base $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ di V tale che $\mathcal{B}' = \{f(\underline{v}_1), \dots, f(\underline{v}_n)\}$ è una base di V' e $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) \forall 1 \leq i, j \leq n$.

Soluzione. Se f è un'isometria, detta \mathcal{B} una base di V , $\mathcal{B}' = f(\mathcal{B})$ è una base di V' dal momento che f è anche un isomorfismo. Inoltre, dacché f è un'isometria, vale sicuramente che $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) \forall 1 \leq i, j \leq n$.

Sia ora assunto per ipotesi che \forall base $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ di V , $\mathcal{B}' = \{f(\underline{v}_1), \dots, f(\underline{v}_n)\}$ è una base di V' e $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) \forall 1 \leq i, j \leq n$. Allora, analogamente a

1 Introduzione al prodotto scalare

prima, detta $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ una base di V , $\mathcal{B}' = f(\mathcal{B})$ è una base di V' , e in quanto tale, per ipotesi, è tale che $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) \forall 1 \leq i, j \leq n$.

Sia infine assunto per ipotesi che \exists base $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ di V tale che $\mathcal{B}' = \{f(\underline{v}_1), \dots, f(\underline{v}_n)\}$ è una base di V' e $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) \forall 1 \leq i, j \leq n$. Siano $\underline{v}, \underline{w} \in V$. Allora $\exists a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n \in \mathbb{K}$ tali che $\underline{v} = a_1 \underline{v}_1 + \dots + a_n \underline{v}_n$ e $\underline{w} = b_1 \underline{v}_1 + \dots + b_n \underline{v}_n$. Si ricava pertanto che:

$$\varphi'(f(\underline{v}), f(\underline{w})) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i b_j \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i b_j \varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi(\underline{v}, \underline{w}),$$

da cui la tesi.

Proposizione 1.9. Sono equivalenti le seguenti affermazioni:

- (i) V e V' sono isometrici;
- (ii) \forall base \mathcal{B} di V , base \mathcal{B}' di V' , $M_{\mathcal{B}}(\varphi)$ e $M_{\mathcal{B}'}(\varphi')$ sono congruenti;
- (iii) \exists base \mathcal{B} di V , base \mathcal{B}' di V' tale che $M_{\mathcal{B}}(\varphi)$ e $M_{\mathcal{B}'}(\varphi')$ sono congruenti.

Dimostrazione. Se V e V' sono isometrici, sia $f : V \rightarrow V'$ un'isometria. Sia $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ una base di V . Allora, poiché f è anche un isomorfismo, $\mathcal{B}' = f(\mathcal{B})$ è una base di V' tale che $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) \forall 1 \leq i, j \leq n$. Pertanto $M_{\mathcal{B}}(\varphi) = M_{\mathcal{B}'}(\varphi')$. Si conclude allora che, cambiando base in V (o in V'), la matrice associata al prodotto scalare varia per congruenza dalla formula di cambiamento di base per il prodotto scalare, da cui si ricava che per ogni scelta di \mathcal{B} base di V e di \mathcal{B}' base di V' , $M_{\mathcal{B}}(\varphi) \cong M_{\mathcal{B}'}(\varphi')$. Inoltre, se tale risultato è vero per ogni \mathcal{B} base di V e di \mathcal{B}' base di V' , dal momento che sicuramente esistono due basi $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ di V e V' , vale anche (ii) \implies (iii).

Si dimostra ora (iii) \implies (i). Per ipotesi $M_{\mathcal{B}}(\varphi) \cong M_{\mathcal{B}'}(\varphi')$, quindi $\exists P \in \text{GL}(n, \mathbb{K}) \mid M_{\mathcal{B}'}(\varphi') = P^{\top} M_{\mathcal{B}}(\varphi) P$. Allora $\exists \mathcal{B}''$ base di V' tale che $P = M_{\mathcal{B}''}^{\mathcal{B}'}$, da cui $P^{-1} = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}''}(\varphi)$. Per la formula di cambiamento di base del prodotto scalare, $M_{\mathcal{B}''}(\varphi) = (P^{-1})^{\top} M_{\mathcal{B}'}(\varphi') P^{-1} = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$. Detta $\mathcal{B}'' = \{\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_n\}$, si costruisce allora l'isomorfismo $f : V \rightarrow V'$ tale che $f(\underline{v}_i) = \underline{w}_i \forall 1 \leq i \leq n$. Dal momento che per costruzione $M_{\mathcal{B}}(\varphi) = M_{\mathcal{B}''}(\varphi)$, $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi'(\underline{w}_i, \underline{w}_j) = \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) \forall 1 \leq i, j \leq n$. Si conclude dunque che $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \varphi'(f(\underline{v}), f(\underline{w})) \forall \underline{v}, \underline{w} \in V$, e dunque che f è un'isometria, come desiderato dalla tesi. \square

Proposizione 1.10. (V, φ) e (V', φ') spazi vettoriali su \mathbb{R} sono isometrici $\iff \varphi$ e φ' hanno la stessa segnatura.

Dimostrazione.

(\implies) Per la precedente proposizione, esistono due basi \mathcal{B} e \mathcal{B}' , una di V e una di

1 Introduzione al prodotto scalare

V' , tali che $M_{\mathcal{B}}(\varphi) \cong M_{\mathcal{B}' }(\varphi)$. Allora queste due matrici condividono la stessa segnatura, e così quindi anche φ e φ' .

(\Leftarrow) Se φ e φ' hanno la stessa segnatura, esistono due basi $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ e $\mathcal{B}' = \{\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_n\}$, una di V e una di V' , tali che $M = M_{\mathcal{B}}(\varphi) = M_{\mathcal{B}' }(\varphi')$ e che M è una matrice di Sylvester. Allora si costruisce $f : V \rightarrow V'$ tale che $f(\underline{v}_i) = \underline{w}_i$. Esso è un isomorfismo, e per costruzione $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \varphi'(\underline{w}_i, \underline{w}_j) = \varphi'(f(\underline{v}_i), f(\underline{v}_j)) \forall 1 \leq i, j \leq n$, da cui si conclude che $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \varphi'(f(\underline{v}), f(\underline{w})) \forall \underline{v}, \underline{w} \in V$, e quindi che V e V' sono isometrici. \square

2 I prodotti hermitiani e complessificazione (non indicizzato)

Definizione. (prodotto hermitiano) Sia $\mathbb{K} = \mathbb{C}$. Una mappa $\varphi : V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ si dice **prodotto hermitiano** se:

- (i) φ è \mathbb{C} -lineare nel secondo argomento, ossia se $\varphi(\underline{v}, \underline{u} + \underline{w}) = \varphi(\underline{v}, \underline{u}) + \varphi(\underline{v}, \underline{w})$ e $\varphi(\underline{v}, a\underline{w}) = a \varphi(\underline{v}, \underline{w})$,
- (ii) $\varphi(\underline{u}, \underline{w}) = \overline{\varphi(\underline{w}, \underline{u})}$.

Definizione. (prodotto hermitiano canonico in \mathbb{C}^n) Si definisce **prodotto hermitiano canonico** di \mathbb{C}^n il prodotto $\varphi : \mathbb{C}^n \times \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}$ tale per cui, detti $\underline{v} = (z_1 \cdots z_n)^\top$ e $\underline{w} = (w_1 \cdots w_n)^\top$, $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \sum_{i=1}^n \overline{z_i} w_i$.

Osservazione.

- ▶ $\varphi(\underline{u} + \underline{w}, \underline{v}) = \overline{\varphi(\underline{v}, \underline{u} + \underline{w})} = \overline{\varphi(\underline{v}, \underline{u}) + \varphi(\underline{v}, \underline{w})} = \overline{\varphi(\underline{v}, \underline{u})} + \overline{\varphi(\underline{v}, \underline{w})} = \varphi(\underline{w}, \underline{v}) + \varphi(\underline{u}, \underline{v})$, ossia φ è additiva anche nel primo argomento.
- ▶ $\varphi(a\underline{v}, \underline{w}) = \overline{\varphi(\underline{w}, a\underline{v})} = \overline{a \varphi(\underline{w}, \underline{v})} = \overline{a} \varphi(\underline{w}, \underline{v})$.
- ▶ $\varphi(\underline{v}, \underline{v}) = \overline{\varphi(\underline{v}, \underline{v})}$, e quindi $\varphi(\underline{v}, \underline{v}) \in \mathbb{R}$.
- ▶ Sia $\underline{v} = \sum_{i=1}^n x_i \underline{v}_i$ e sia $\underline{w} = \sum_{i=1}^n y_i \underline{v}_i$, allora $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \overline{x_i} y_j \varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j)$.
- ▶ $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0 \iff \varphi(\underline{w}, \underline{v}) = 0$.

Proposizione 2.1. Data la forma quadratica $q : V \rightarrow \mathbb{R}$ del prodotto hermitiano φ tale che $q(\underline{v}) = \varphi(\underline{v}, \underline{v}) \in \mathbb{R}$, tale forma quadratica individua univocamente il prodotto hermitiano φ .

Dimostrazione. Innanzitutto si osserva che:

$$\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \frac{\varphi(\underline{v}, \underline{w}) + \overline{\varphi(\underline{v}, \underline{w})}}{2} + \frac{\varphi(\underline{v}, \underline{w}) - \overline{\varphi(\underline{v}, \underline{w})}}{2}.$$

Si considerano allora le due identità:

$$q(\underline{v} + \underline{w}) - q(\underline{v}) - q(\underline{w}) = \varphi(\underline{v}, \underline{w}) + \overline{\varphi(\underline{w}, \underline{v})} = 2 \Re(\varphi(\underline{v}, \underline{w})),$$

$$q(i\underline{v} + \underline{w}) - q(\underline{v}) - q(\underline{w}) = -i(\varphi(\underline{v}, \underline{w}) - \overline{\varphi(\underline{v}, \underline{w})}) = 2 \Im(\varphi(\underline{v}, \underline{w})),$$

da cui si conclude che il prodotto φ è univocamente determinato dalla sua forma quadratica. \square

2 I prodotti hermitiani e complessificazione (non indicizzato)

Definizione. Si definisce **matrice aggiunta** di $A \in M(n, \mathbb{K})$ la matrice coniugata della trasposta di A , ossia:

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

Osservazione. Per quanto riguarda la matrice aggiunta valgono le principali proprietà della matrice trasposta:

- $(A + B)^* = A^* + B^*$,
- $(AB)^* = B^*A^*$,
- $(A^{-1})^* = (A^*)^{-1}$, se A è invertibile.

Definizione. (matrice associata del prodotto hermitiano) Analogamente al caso del prodotto scalare, data una base $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$ si definisce come **matrice associata del prodotto hermitiano** φ la matrice $M_{\mathcal{B}}(\varphi) = (\varphi(v_i, v_j))_{i,j=1-n}$.

Osservazione. Si osserva che, analogamente al caso del prodotto scalare, vale la seguente identità:

$$\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = [\underline{v}]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) [\underline{w}]_{\mathcal{B}}.$$

Proposizione 2.2. (formula del cambiamento di base per i prodotto hermitiani) Siano $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ due basi di V . Allora vale la seguente identità:

$$M_{\mathcal{B}'} = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(\text{Id}_V)^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{Id}_V).$$

Dimostrazione. Siano $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$ e $\mathcal{B}' = \{w_1, \dots, w_n\}$. Allora $\varphi(w_i, w_j) = [w_i]_{\mathcal{B}'}^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) [w_j]_{\mathcal{B}'} = \left(M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(\text{Id}_V)^i \right)^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{Id}_V)^j = \left(M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(\text{Id}_V) \right)_i^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{Id}_V)^j$, da cui si ricava l'identità desiderata. \square

Definizione. (radicale di un prodotto hermitiano) Analogamente al caso del prodotto scalare, si definisce il **radicale** del prodotto φ come il seguente sottospazio:

$$V^\perp = \{ \underline{v} \in V \mid \varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0 \ \forall \underline{w} \in V \}.$$

Proposizione 2.3. Sia \mathcal{B} una base di V e φ un prodotto hermitiano. Allora $V^\perp = [\cdot]_{\mathcal{B}}^{-1}(\text{Ker } M_{\mathcal{B}}(\varphi))$.

Dimostrazione. Sia $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$ e sia $\underline{v} \in V^\perp$. Siano $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{K}$ tali che $\underline{v} = a_1 v_1 + \dots + a_n v_n$. Allora, poiché $\underline{v} \in V^\perp$, $0 = \varphi(v_i, \underline{v}) = a_1 \varphi(v_i, v_1) + \dots + a_n \varphi(v_i, v_n) = M_i[\underline{v}]_{\mathcal{B}}$, da cui si ricava che $[\underline{v}]_{\mathcal{B}} \in \text{Ker } M_{\mathcal{B}}(\varphi)$, e quindi che $V^\perp \subseteq [\cdot]_{\mathcal{B}}^{-1}(\text{Ker } M_{\mathcal{B}}(\varphi))$.

Sia ora $\underline{v} \in V$ tale che $[\underline{v}]_{\mathcal{B}} \in \text{Ker } M_{\mathcal{B}}(\varphi)$. Allora, per ogni $\underline{w} \in V$, $\varphi(\underline{w}, \underline{v}) = [\underline{w}]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) [\underline{v}]_{\mathcal{B}} = [\underline{w}]_{\mathcal{B}}^* 0 = 0$, da cui si conclude che $\underline{v} \in V^\perp$, e quindi che $V^\perp \supseteq [\cdot]_{\mathcal{B}}^{-1}(\text{Ker } M_{\mathcal{B}}(\varphi))$, da cui $V^\perp = [\cdot]_{\mathcal{B}}^{-1}(\text{Ker } M_{\mathcal{B}}(\varphi))$, ossia la tesi. \square

¹Stavolta non è sufficiente considerare la mappa $f : V \rightarrow V^*$ tale che $f(\underline{v}) = [\underline{w} \mapsto \varphi(\underline{v}, \underline{w})]$, dal momento che f non è lineare, bensì antilineare, ossia $f(a\underline{v}) = \bar{a}f(\underline{v})$.

Osservazione. Come conseguenza della proposizione appena dimostrata, valgono le principali proprietà già viste per il prodotto scalare.

- ▶ $\det(M_{\mathcal{B}}(\varphi)) = 0 \iff V^{\perp} \neq \{0\} \iff \varphi$ è degenere,
- ▶ Vale il teorema di Lagrange, e quindi quello di Sylvester, benché con alcune accortezze: si introduce, come nel caso di \mathbb{R} , il concetto di segnatura, che diventa l'invariante completo della nuova congruenza hermitiana, che ancora una volta si dimostra essere una relazione di equivalenza.
- ▶ Come mostrato nei momenti finali del documento (vd. *Esercizio 3*), vale la formula delle dimensioni anche nel caso del prodotto hermitiano.

Definizione. (restrizione ai reali di uno spazio) Sia V uno spazio vettoriale su \mathbb{C} con base \mathcal{B} . Si definisce allora lo spazio $V_{\mathbb{R}}$, detto **spazio di restrizione su \mathbb{R}** di V , come uno spazio su \mathbb{R} generato da $\mathcal{B}_{\mathbb{R}} = \mathcal{B} \cup i\mathcal{B}$.

Esempio. Si consideri $V = \mathbb{C}^3$. Una base di \mathbb{C}^3 è chiaramente $\{\underline{e}_1, \underline{e}_2, \underline{e}_3\}$. Allora $V_{\mathbb{R}}$ sarà uno spazio vettoriale su \mathbb{R} generato dai vettori $\{\underline{e}_1, \underline{e}_2, \underline{e}_3, i\underline{e}_1, i\underline{e}_2, i\underline{e}_3\}$.

Osservazione. Si osserva che lo spazio di restrizione su \mathbb{R} e lo spazio di partenza condividono lo stesso insieme di vettori. Infatti, $\text{Span}_{\mathbb{C}}(\mathcal{B}) = \text{Span}_{\mathbb{R}}(\mathcal{B} \cup i\mathcal{B})$. Ciononostante, $\dim V_{\mathbb{R}} = 2 \dim V^2$, se $\dim V \in \mathbb{N}$.

Definizione. (complessificazione di uno spazio) Sia V uno spazio vettoriale su \mathbb{R} . Si definisce allora lo **spazio complessificato** $V_{\mathbb{C}} = V \times V$ su \mathbb{C} con le seguenti operazioni:

- $(\underline{v}, \underline{w}) + (\underline{v}', \underline{w}') = (\underline{v} + \underline{v}', \underline{w} + \underline{w}')$,
- $(a + bi)(\underline{v}, \underline{w}) = (a\underline{v} - b\underline{w}, a\underline{w} + b\underline{v})$.

Osservazione. La costruzione dello spazio complessificato emula in realtà la costruzione di \mathbb{C} come spazio $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Infatti se $z = (c, d)$, vale che $(a + bi)(c, d) = (ac - bd, ad + bc)$, mentre si mantiene l'usuale operazione di addizione. In particolare si può identificare l'insieme $V \times \{0\}$ come V , mentre $\{0\} \times V$ viene identificato come l'insieme degli immaginari iV di $V_{\mathbb{C}}$. Infine, moltiplicare per uno scalare reale un elemento di $V \times \{0\}$ equivale a moltiplicare la sola prima componente con l'usuale operazione di moltiplicazione di V . Allora, come accade per \mathbb{C} , si può sostituire la notazione $(\underline{v}, \underline{w})$ con la più comoda notazione $\underline{v} + i\underline{w}$.

Osservazione. Sia $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ una base di V . Innanzitutto si osserva che $(a + bi)(\underline{v}, 0) = (a\underline{v}, b\underline{v})$. Pertanto si può concludere che $\mathcal{B} \times \{0\}$ è una base dello spazio complessificato $V_{\mathbb{C}}$ su \mathbb{C} .

²Si sarebbe potuto ottenere lo stesso risultato utilizzando il teorema delle torri algebriche: $[V_{\mathbb{R}} : \mathbb{R}] = [V : \mathbb{C}][\mathbb{C} : \mathbb{R}] = 2[V : \mathbb{C}]$.

2 I prodotti hermitiani e complessificazione (non indicizzato)

Infatti, se $(a_1 + b_1 i)(\underline{v}_1, \underline{0}) + \dots + (a_n + b_n i)(\underline{v}_n, \underline{0}) = (\underline{0}, \underline{0})$, allora $(a_1 \underline{v}_1 + \dots + a_n \underline{v}_n, b_1 \underline{v}_1 + \dots + b_n \underline{v}_n) = (\underline{0}, \underline{0})$. Poiché però \mathcal{B} è linearmente indipendente per ipotesi, l'ultima identità implica che $a_1 = \dots = a_n = b_1 = \dots = b_n = 0$, e quindi che $\mathcal{B} \times \{\underline{0}\}$ è linearmente indipendente.

Inoltre $\mathcal{B} \times \{\underline{0}\}$ genera $V_{\mathbb{C}}$. Se infatti $\underline{v} = (\underline{u}, \underline{w})$, e vale che:

$$\underline{u} = a_1 \underline{v}_1 + \dots + a_n \underline{v}_n, \quad \underline{w} = b_1 \underline{v}_1 + \dots + b_n \underline{v}_n,$$

allora $\underline{v} = (a_1 + b_1 i)(\underline{v}_1, \underline{0}) + \dots + (a_n + b_n i)(\underline{v}_n, \underline{0})$. Quindi $\dim V_{\mathbb{C}} = \dim V$.

Definizione. Sia f un'applicazione \mathbb{C} -lineare di V spazio vettoriale su \mathbb{C} . Allora si definisce la **restrizione su \mathbb{R}** di f , detta $f_{\mathbb{R}} : V_{\mathbb{R}} \rightarrow V_{\mathbb{R}}$, in modo tale che $f_{\mathbb{R}}(\underline{v}) = f(\underline{v})$.

Osservazione. Sia $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ una base di V su \mathbb{C} . Sia $A = M_{\mathcal{B}}(f)$. Si osserva allora che, se $\mathcal{B}' = \mathcal{B} \cup i\mathcal{B}$ e $A = A' + iA''$ con $A', A'' \in M(n, \mathbb{R})$, vale la seguente identità:

$$M_{\mathcal{B}'}(f_{\mathbb{R}}) = \left(\begin{array}{c|c} A' & -A'' \\ \hline A'' & A' \end{array} \right).$$

Infatti, se $f(\underline{v}_i) = (a_1 + b_1 i)\underline{v}_1 + \dots + (a_n + b_n i)\underline{v}_n$, vale che $f_{\mathbb{R}}(\underline{v}_i) = a_1 \underline{v}_1 + \dots + a_n \underline{v}_n + b_1(i\underline{v}_1) + \dots + b_n(i\underline{v}_n)$, mentre $f_{\mathbb{R}}(i\underline{v}_i) = if(\underline{v}_i) = -b_1 \underline{v}_1 + \dots - b_n \underline{v}_n + a_1(i\underline{v}_1) + \dots + a_n(i\underline{v}_n)$.

Definizione. Sia f un'applicazione \mathbb{R} -lineare di V spazio vettoriale su \mathbb{R} . Allora si definisce la **complessificazione** di f , detta $f_{\mathbb{C}} : V_{\mathbb{C}} \rightarrow V_{\mathbb{C}}$, in modo tale che $f_{\mathbb{C}}(\underline{v} + i\underline{w}) = f(\underline{v}) + if(\underline{w})$.

Osservazione. Si verifica infatti che $f_{\mathbb{C}}$ è \mathbb{C} -lineare.

- $f_{\mathbb{C}}((\underline{v}_1 + i\underline{w}_1) + (\underline{v}_2 + i\underline{w}_2)) = f_{\mathbb{C}}((\underline{v}_1 + \underline{v}_2) + i(\underline{w}_1 + \underline{w}_2)) = f(\underline{v}_1 + \underline{v}_2) + if(\underline{w}_1 + \underline{w}_2) = (f(\underline{v}_1) + if(\underline{w}_1)) + (f(\underline{v}_2) + if(\underline{w}_2)) = f_{\mathbb{C}}(\underline{v}_1 + i\underline{w}_1) + f_{\mathbb{C}}(\underline{v}_2 + i\underline{w}_2)$.
- $f_{\mathbb{C}}((a + bi)(\underline{v} + i\underline{w})) = f_{\mathbb{C}}(a\underline{v} - b\underline{w} + i(a\underline{w} + b\underline{v})) = f(a\underline{v} - b\underline{w}) + if(a\underline{w} + b\underline{v}) = af(\underline{v}) - bf(\underline{w}) + i(af(\underline{w}) + bf(\underline{v})) = (a + bi)(f(\underline{v}) + if(\underline{w})) = (a + bi)f_{\mathbb{C}}(\underline{v} + i\underline{w})$.

Proposizione 2.4. Sia $f_{\mathbb{C}}$ la complessificazione di $f \in \text{End}(V)$, dove V è uno spazio vettoriale su \mathbb{R} . Sia inoltre $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ una base di V . Valgono allora i seguenti risultati:

(i) $(f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}}|_V$ assume gli stessi valori di f ,

(ii) $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(f) \in M(n, \mathbb{R})$,

(iii) $M_{\mathcal{B} \cup i\mathcal{B}}((f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}}) = \left(\begin{array}{c|c} M_{\mathcal{B}}(f) & 0 \\ \hline 0 & M_{\mathcal{B}}(f) \end{array} \right)$.

Dimostrazione. Si dimostrano i risultati separatamente.

2 I prodotti hermitiani e complessificazione (non indicizzato)

- (i) Si osserva che $(f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}}(\underline{v}_i) = f_{\mathbb{C}}(\underline{v}_i) = f(\underline{v}_i)$. Dal momento che $(f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}}$ è \mathbb{R} -lineare, si conclude che $(f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}}$ assume gli stessi valori di f .
- (ii) Dal momento che \mathcal{B} , nell'identificazione di $(\underline{v}, \underline{0})$ come \underline{v} , è sempre una base di $V_{\mathbb{C}}$, e $f_{\mathbb{C}}(\underline{v}_i) = f(\underline{v}_i)$, chiaramente $[f_{\mathbb{C}}(\underline{v}_i)]_{\mathcal{B}} = [f(\underline{v}_i)]_{\mathcal{B}}$, e quindi $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(f)$, dove si osserva anche che $M_{\mathcal{B}}(f) \in M(n, \mathbb{R})$, essendo V uno spazio vettoriale su \mathbb{R} .
- (iii) Sia $f(\underline{v}_i) = a_1 \underline{v}_1 + \dots + a_n \underline{v}_n$ con $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$. Come osservato in (i), $(f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}}|_{\mathcal{B}} = (f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}}|_{\mathcal{B}}$, e quindi la prima metà di $M_{\mathcal{B} \cup i\mathcal{B}}((f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}})$ è formata da due blocchi: uno verticale coincidente con $M_{\mathcal{B}}(f)$ e un altro completamente nullo, dal momento che non compare alcun termine di $i\mathcal{B}$ nella scrittura di $(f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}}(\underline{v}_i)$. Al contrario, per $i\mathcal{B}$, $(f_{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}}(i\underline{v}_i) = f_{\mathbb{C}}(i\underline{v}_i) = if(\underline{v}_i) = a_1(i\underline{v}_1) + \dots + a_n(i\underline{v}_n)$; pertanto la seconda metà della matrice avrà i due blocchi della prima metà, benché scambiati.

□

Osservazione. Dal momento che $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(f)$, $f_{\mathbb{C}}$ e f condividono lo stesso polinomio caratteristico e vale che $\text{sp}(f) \subseteq \text{sp}(f_{\mathbb{C}})$, dove vale l'uguaglianza se e solo se tale polinomio caratteristico è completamente riducibile in \mathbb{R} . Inoltre, se V_{λ} è l'autospazio su V dell'autovalore λ , l'autospazio su $V_{\mathbb{C}}$, rispetto a $f_{\mathbb{C}}$, è invece $V_{\mathbb{C}\lambda} = V_{\lambda} + iV_{\lambda}$, la cui dimensione rimane invariata rispetto a V_{λ} , ossia $\dim V_{\lambda} = \dim V_{\mathbb{C}\lambda}$ (infatti, analogamente a prima, una base di V_{λ} può essere identificata come base anche per $V_{\mathbb{C}\lambda}$).

Proposizione 2.5. Sia $f_{\mathbb{C}}$ la complessificazione di $f \in \text{End}(V)$, dove V è uno spazio vettoriale su \mathbb{R} . Sia inoltre $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ una base di V . Allora un endomorfismo $\tilde{g} : V_{\mathbb{C}} \rightarrow V_{\mathbb{C}}$ complessifica un endomorfismo $g \in \text{End}(V) \iff M_{\mathcal{B}}(\tilde{g}) \in M(n, \mathbb{R})$.

Dimostrazione. Se \tilde{g} complessifica $g \in \text{End}(V)$, allora, per la proposizione precedente, $M_{\mathcal{B}}(\tilde{g}) = M_{\mathcal{B}}(g) \in M(n, \mathbb{R})$. Se invece $A = M_{\mathcal{B}}(\tilde{g}) \in M(n, \mathbb{R})$, si considera $g = M_{\mathcal{B}}^{-1}(A) \in \text{End}(V)$. Si verifica facilmente che \tilde{g} non è altro che il complessificato di tale g :

- $\tilde{g}(\underline{v}_i) = g(\underline{v}_i)$, dove l'uguaglianza è data dal confronto delle matrici associate, e quindi $\tilde{g}|_V = g$;
- $\tilde{g}(\underline{v} + i\underline{w}) = \tilde{g}(\underline{v}) + i\tilde{g}(\underline{w}) = g(\underline{v}) + ig(\underline{w})$, da cui la tesi.

□

Proposizione 2.6. Sia φ un prodotto scalare di V spazio vettoriale su \mathbb{R} . Allora esiste un unico prodotto hermitiano $\varphi_{\mathbb{C}} : V_{\mathbb{C}} \times V_{\mathbb{C}} \rightarrow \mathbb{C}$ che estende φ (ossia tale che $\varphi_{\mathbb{C}}|_{V \times V} = \varphi$), il quale assume la stessa segnatura di φ .

Dimostrazione. Sia \mathcal{B} una base di Sylvester per φ . Si consideri allora il prodotto $\varphi_{\mathbb{C}}$ tale che:

$$\varphi_{\mathbb{C}}(\underline{v}_1 + i\underline{w}_1, \underline{v}_2 + i\underline{w}_2) = \varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_2) + \varphi(\underline{w}_1, \underline{w}_2) + i(\varphi(\underline{v}_1, \underline{w}_1) - \varphi(\underline{w}_1, \underline{v}_2)).$$

Chiaramente $\varphi_{\mathbb{C}}|_{V \times V} = \varphi$. Si verifica allora che $\varphi_{\mathbb{C}}$ è hermitiano:

2 I prodotti hermitiani e complessificazione (non indicizzato)

- $\varphi_{\mathbb{C}}(\underline{v} + i\underline{w}, (\underline{v}_1 + i\underline{w}_1) + (\underline{v}_2 + i\underline{w}_2)) = \varphi(\underline{v}, \underline{v}_1 + \underline{v}_2) + \varphi(\underline{w}, \underline{w}_1 + \underline{w}_2) + i(\varphi(\underline{v}, \underline{w}_1 + \underline{w}_2) - \varphi(\underline{w}, \underline{v}_1 + \underline{v}_2)) = [\varphi(\underline{v}, \underline{v}_1) + \varphi(\underline{w}, \underline{w}_1) + i(\varphi(\underline{v}, \underline{w}_1) - \varphi(\underline{w}, \underline{v}_1))] + [\varphi(\underline{v}, \underline{v}_2) + \varphi(\underline{w}, \underline{w}_2) + i(\varphi(\underline{v}, \underline{w}_2) - \varphi(\underline{w}, \underline{v}_2))] = \varphi_{\mathbb{C}}(\underline{v} + i\underline{w}, \underline{v}_1 + i\underline{w}_1) + \varphi_{\mathbb{C}}(\underline{v} + i\underline{w}, \underline{v}_2 + i\underline{w}_2)$ (additività nel secondo argomento),
- $\varphi_{\mathbb{C}}(\underline{v} + i\underline{w}, (a + bi)(\underline{v}_1 + i\underline{w}_1)) = \varphi_{\mathbb{C}}(\underline{v} + i\underline{w}, a\underline{v}_1 - b\underline{w}_1 + i(b\underline{v}_1 + a\underline{w}_1)) = \varphi(\underline{v}, a\underline{v}_1 - b\underline{w}_1) + \varphi(\underline{w}, b\underline{v}_1 + a\underline{w}_1) + i(\varphi(\underline{v}, b\underline{v}_1 + a\underline{w}_1) - \varphi(\underline{w}, a\underline{v}_1 - b\underline{w}_1)) = a\varphi(\underline{v}, \underline{v}_1) - b\varphi(\underline{v}, \underline{w}_1) + b\varphi(\underline{w}, \underline{v}_1) + a\varphi(\underline{w}, \underline{w}_1) + i(b\varphi(\underline{v}, \underline{v}_1) + a\varphi(\underline{v}, \underline{w}_1) - a\varphi(\underline{w}, \underline{v}_1) + b\varphi(\underline{w}, \underline{w}_1)) = a(\varphi(\underline{v}, \underline{v}_1) + \varphi(\underline{w}, \underline{w}_1)) - b(\varphi(\underline{v}, \underline{w}_1) - \varphi(\underline{w}, \underline{v}_1)) + i(a(\varphi(\underline{v}, \underline{w}_1) - \varphi(\underline{w}, \underline{v}_1)) + b(\varphi(\underline{v}, \underline{v}_1) + \varphi(\underline{w}, \underline{w}_1))) = (a + bi)(\varphi(\underline{v}, \underline{v}_1) + \varphi(\underline{w}, \underline{w}_1) + i(\varphi(\underline{v}, \underline{w}_1) - \varphi(\underline{w}, \underline{v}_1))) = (a + bi)\varphi_{\mathbb{C}}(\underline{v} + \underline{w}, \underline{v}_1 + i\underline{w}_1)$ (omogeneità nel secondo argomento),
- $\varphi_{\mathbb{C}}(\underline{v}_1 + i\underline{w}_1, \underline{v}_2 + i\underline{w}_2) = \varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_2) + \varphi(\underline{w}_1, \underline{w}_2) + i(\varphi(\underline{v}_1, \underline{w}_2) - \varphi(\underline{w}_1, \underline{v}_2)) = \overline{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_2) + \varphi(\underline{w}_1, \underline{w}_2) + i(\varphi(\underline{w}_1, \underline{v}_2) - \varphi(\underline{v}_1, \underline{w}_2))} = \overline{\varphi(\underline{v}_2, \underline{v}_1) + \varphi(\underline{w}_2, \underline{w}_1) + i(\varphi(\underline{v}_2, \underline{w}_1) - \varphi(\underline{w}_2, \underline{v}_1))} = \varphi_{\mathbb{C}}(\underline{v}_2 + \underline{w}_2, \underline{v}_1 + \underline{w}_1)$ (coniugio nello scambio degli argomenti).

Ogni prodotto hermitiano τ che estende il prodotto scalare φ ha la stessa matrice associata nella base \mathcal{B} , essendo $\tau(\underline{v}_i, \underline{v}_i) = \varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_i)$ vero per ipotesi. Pertanto τ è unico, e vale che $\tau = \varphi_{\mathbb{C}}$. Dal momento che $M_{\mathcal{B}}(\varphi_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$ è una matrice di Sylvester, $\varphi_{\mathbb{C}}$ mantiene anche la stessa segnatura di φ . \square

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

Nota. Nel corso del documento, per V si intenderà uno spazio vettoriale di dimensione finita n e per φ un suo prodotto, hermitiano o scalare dipendentemente dal contesto.

Teorema 3.1. (di rappresentazione di Riesz per il prodotto scalare) Sia V uno spazio vettoriale e sia φ un suo prodotto scalare non degenerare. Allora per ogni $f \in V^*$ esiste un unico $\underline{v} \in V$ tale che $f(\underline{w}) = \varphi(\underline{v}, \underline{w}) \forall \underline{w} \in V$.

Dimostrazione. Si consideri l'applicazione a_φ . Poiché φ non è degenerare, $\text{Ker } a_\varphi = V^\perp = \{0\}$, da cui si deduce che a_φ è un isomorfismo. Quindi $\forall f \in V^*$ esiste un unico $\underline{v} \in V$ tale per cui $a_\varphi(\underline{v}) = f$, e dunque tale per cui $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = a_\varphi(\underline{v})(\underline{w}) = f(\underline{w}) \forall \underline{w} \in V$. \square

Dimostrazione costruttiva. Sia $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ una base ortogonale di V per φ . Allora \mathcal{B}^* è una base di V^* . In particolare $f = f(\underline{v}_1)\underline{v}_1^* + \dots + f(\underline{v}_n)\underline{v}_n^*$. Sia $\underline{v} = \frac{f(\underline{v}_1)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)}\underline{v}_1 + \dots + \frac{f(\underline{v}_n)}{\varphi(\underline{v}_n, \underline{v}_n)}$. Detto $\underline{w} = a_1\underline{v}_1 + \dots + a_n\underline{v}_n$, si deduce che $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = a_1f(\underline{v}_1) + \dots + a_nf(\underline{v}_n) = f(\underline{w})$. Se esistesse $\underline{v}' \in V$ con la stessa proprietà di \underline{v} , $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \varphi(\underline{v}', \underline{w}) \implies \varphi(\underline{v} - \underline{v}', \underline{w}) \forall \underline{w} \in V$. Si deduce dunque che $\underline{v} - \underline{v}' \in V^\perp$, contenente solo 0 dacché φ è non degenerare; e quindi si conclude che $\underline{v} = \underline{v}'$, ossia che esiste solo un vettore con la stessa proprietà di \underline{v} . \square

Teorema 3.2. (di rappresentazione di Riesz per il prodotto hermitiano) Sia V uno spazio vettoriale su \mathbb{C} e sia φ un suo prodotto hermitiano non degenerare. Allora per ogni $f \in V^*$ esiste un unico $\underline{v} \in V$ tale che $f(\underline{w}) = \varphi(\underline{v}, \underline{w}) \forall \underline{w} \in V$.

Dimostrazione. Sia $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ una base ortogonale di V per φ . Allora \mathcal{B}^* è una base di V^* . In particolare $f = f(\underline{v}_1)\underline{v}_1^* + \dots + f(\underline{v}_n)\underline{v}_n^*$. Sia $\underline{v} = \frac{\overline{f(\underline{v}_1)}}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)}\underline{v}_1 + \dots + \frac{\overline{f(\underline{v}_n)}}{\varphi(\underline{v}_n, \underline{v}_n)}$. Detto $\underline{w} = a_1\underline{v}_1 + \dots + a_n\underline{v}_n$, si deduce che $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = a_1\overline{f(\underline{v}_1)} + \dots + a_n\overline{f(\underline{v}_n)} = \overline{f(\underline{w})}$. Se esistesse $\underline{v}' \in V$ con la stessa proprietà di \underline{v} , $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \varphi(\underline{v}', \underline{w}) \implies \varphi(\underline{v} - \underline{v}', \underline{w}) \forall \underline{w} \in V$. Si deduce dunque che $\underline{v} - \underline{v}' \in V^\perp$, contenente solo 0 dacché φ è non degenerare; e quindi si conclude che $\underline{v} = \underline{v}'$, ossia che esiste solo un vettore con la stessa proprietà di \underline{v} . \square

Proposizione 3.1. Sia V uno spazio vettoriale con prodotto scalare φ non degenerare. Sia $f \in \text{End}(V)$. Allora esiste un unico endomorfismo $f_\varphi^\top : V \rightarrow V$, detto il **trasposto di f** e indicato con f^\top in assenza di ambiguità¹, tale che:

¹Si tenga infatti in conto della differenza tra $f_\varphi^\top : V \rightarrow V$, di cui si discute nell'enunciato, e $f^\top : V^* \rightarrow V^*$ che invece è tale che $f^{\text{top}}(g) = g \circ f$.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

$$a_\varphi \circ g = f^\top \circ a_\varphi,$$

ossia che:

$$\varphi(\underline{v}, f(\underline{w})) = \varphi(g(\underline{v}), \underline{w}) \quad \forall \underline{v}, \underline{w} \in V.$$

Dimostrazione. Si consideri $(f^\top \circ a_\varphi)(\underline{v}) \in V^*$. Per il teorema di rappresentazione di Riesz per il prodotto scalare, esiste un unico \underline{v}' tale che $(f^\top \circ a_\varphi)(\underline{v})(\underline{w}) = \varphi(\underline{v}', \underline{w}) \implies \varphi(\underline{v}, f(\underline{w})) = \varphi(\underline{v}', \underline{w}) \quad \forall \underline{w} \in V$. Si costruisce allora una mappa $f_\varphi^\top : V \rightarrow V$ che associa a \underline{v} tale \underline{v}' . Si dimostra che f_φ^\top è un'applicazione lineare, e che dunque è un endomorfismo:

- (i) Siano $\underline{v}_1, \underline{v}_2 \in V$. Si deve dimostrare innanzitutto che $f_\varphi^\top(\underline{v}_1 + \underline{v}_2) = f_\varphi^\top(\underline{v}_1) + f_\varphi^\top(\underline{v}_2)$, ossia che $\varphi(f_\varphi^\top(\underline{v}_1) + f_\varphi^\top(\underline{v}_2), \underline{w}) = \varphi(\underline{v}_1 + \underline{v}_2, f(\underline{w})) \quad \forall \underline{w} \in V$.

Si osservano le seguenti identità:

$$\begin{aligned} \varphi(\underline{v}_1 + \underline{v}_2, f(\underline{w})) &= \varphi(\underline{v}_1, f(\underline{w})) + \varphi(\underline{v}_2, f(\underline{w})) = (*), \\ \varphi(f_\varphi^\top(\underline{v}_1) + f_\varphi^\top(\underline{v}_2), \underline{w}) &= \varphi(f_\varphi^\top(\underline{v}_1), \underline{w}) + \varphi(f_\varphi^\top(\underline{v}_2), \underline{w}) = (*), \end{aligned}$$

da cui si deduce l'uguaglianza desiderata, essendo $f_\varphi^\top(\underline{v}_1 + \underline{v}_2)$ l'unico vettore di V con la proprietà enunciata dal teorema di rappresentazione di Riesz.

- (ii) Sia $\underline{v} \in V$. Si deve dimostrare che $f_\varphi^\top(a\underline{v}) = af_\varphi^\top(\underline{v})$, ossia che $\varphi(af_\varphi^\top(\underline{v}), \underline{w}) = \varphi(a\underline{v}, f(\underline{w})) \quad \forall a \in \mathbb{K}, \underline{w} \in V$. È sufficiente moltiplicare per a l'identità $\varphi(f_\varphi^\top(\underline{v}), \underline{w}) = \varphi(\underline{v}, f(\underline{w}))$. Analogamente a prima, si deduce che $f_\varphi^\top(a\underline{v}) = af_\varphi^\top(\underline{v})$, essendo $f_\varphi^\top(a\underline{v})$ l'unico vettore di V con la proprietà enunciata dal teorema di rappresentazione di Riesz.

Infine si dimostra che f_φ^\top è unico. Sia infatti g un endomorfismo di V che condivide la stessa proprietà di f_φ^\top . Allora $\varphi(f_\varphi^\top(\underline{v}), \underline{w}) = \varphi(\underline{v}, f(\underline{w})) = \varphi(g(\underline{v}), \underline{w}) \quad \forall \underline{v}, \underline{w} \in V$, da cui si deduce che $\varphi(f_\varphi^\top(\underline{v}) - g(\underline{v}), \underline{w}) = 0 \quad \forall \underline{v}, \underline{w} \in V$, ossia che $f_\varphi^\top(\underline{v}) - g(\underline{v}) \in V^\perp \quad \forall \underline{v} \in V$. Tuttavia φ è non degenere, e quindi $V^\perp = \{0\}$, da cui si deduce che deve valere l'identità $f_\varphi^\top(\underline{v}) = g(\underline{v}) \quad \forall \underline{v} \in V$, ossia $g = f_\varphi^\top$. \square

Proposizione 3.2. Sia V uno spazio vettoriale su \mathbb{C} e sia φ un suo prodotto hermitiano. Allora esiste un'unica mappa² $f^* : V \rightarrow V$, detta **aggiunto di f** , tale che $\varphi(\underline{v}, f(\underline{w})) = \varphi(f^*(\underline{v}), \underline{w}) \quad \forall \underline{v}, \underline{w} \in V$.

Dimostrazione. Sia $\underline{v} \in V$. Si consideri il funzionale σ tale che $\sigma(\underline{w}) = \varphi(\underline{v}, f(\underline{w}))$. Per il teorema di rappresentazione di Riesz per il prodotto scalare esiste un unico $\underline{v}' \in V$ tale per cui $\varphi(\underline{v}, f(\underline{w})) = \sigma(\underline{w}) = \varphi(\underline{v}', \underline{w})$. Si costruisce allora una mappa f^* che associa \underline{v} a

²Si osservi che f^* non è un'applicazione lineare, benché sia invece *antilineare*.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

tale \underline{v}' .

Si dimostra infine che la mappa f^* è unica. Sia infatti $\mu : V \rightarrow V$ che condivide la stessa proprietà di f^* . Allora $\varphi(f^*(\underline{v}), \underline{w}) = \varphi(\underline{v}, f(\underline{w})) = \varphi(\mu(\underline{v}), \underline{w}) \forall \underline{v}, \underline{w} \in V$, da cui si deduce che $\varphi(f^*(\underline{v}) - \mu(\underline{v}), \underline{w}) = 0 \forall \underline{v}, \underline{w} \in V$, ossia che $f^*(\underline{v}) - \mu(\underline{v}) \in V^\perp \forall \underline{v} \in V$. Tuttavia φ è non degenere, e quindi $V^\perp = \{0\}$, da cui si deduce che deve valere l'identità $f^*(\underline{v}) = \mu(\underline{v}) \forall \underline{v} \in V$, ossia $\mu = f^*$. \square

Osservazione. L'operazione di trasposizione di un endomorfismo sul prodotto scalare non degenere φ è un'involuzione. Infatti valgono le seguenti identità $\forall \underline{v}, \underline{w} \in V$:

$$\begin{cases} \varphi(\underline{w}, f^\top(\underline{v})) = \varphi(f^\top(\underline{v}), \underline{w}) = \varphi(\underline{v}, f(\underline{w})), \\ \varphi(\underline{w}, f^\top(\underline{v})) = \varphi((f^\top)^\top(\underline{w}), \underline{v}) = \varphi(\underline{v}, (f^\top)^\top(\underline{w})). \end{cases}$$

Si conclude allora, poiché φ è non degenere, che $f(\underline{w}) = (f^\top)^\top(\underline{w}) \forall \underline{w} \in V$, ossia che $f = (f^\top)^\top$.

Osservazione. Analogamente si può dire per l'operazione di aggiunta per un prodotto hermitiano φ non degenere. Valgono infatti le seguenti identità $\forall \underline{v}, \underline{w} \in V$:

$$\begin{cases} \overline{\varphi(\underline{w}, f^*(\underline{v}))} = \varphi(f^*(\underline{v}), \underline{w}) = \varphi(\underline{v}, f(\underline{w})), \\ \overline{\varphi(\underline{w}, f^*(\underline{v}))} = \overline{\varphi((f^*)^*(\underline{w}), \underline{v})} = \varphi(\underline{v}, (f^*)^*(\underline{w})), \end{cases}$$

da cui si deduce, come prima, che $f = (f^*)^*$.

Definizione. (base ortonormale) Si definisce **base ortonormale** di uno spazio vettoriale V su un suo prodotto φ una base ortogonale $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ tale che $\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \delta_{ij}$.

Proposizione 3.3. Sia φ un prodotto scalare non degenere di V . Sia $f \in \text{End}(V)$. Allora vale la seguente identità:

$$M_{\mathcal{B}}(f_\varphi^\top) = M_{\mathcal{B}}(\varphi)^{-1} M_{\mathcal{B}}(f)^\top M_{\mathcal{B}}(\varphi),$$

dove \mathcal{B} è una base di V .

Dimostrazione. Sia \mathcal{B}^* la base relativa a \mathcal{B} in V^* . Per la proposizione precedente vale la seguente identità:

$$a_\varphi \circ f_\varphi^\top = f^\top \circ a_\varphi.$$

Pertanto, passando alle matrici associate, si ricava che:

$$M_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{B}}(a_\varphi) M_{\mathcal{B}}(f_\varphi^\top) = M_{\mathcal{B}^*}(f^\top) M_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{B}}(a_\varphi).$$

Dal momento che valgono le seguenti due identità:

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

$$M_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{B}}(a_\varphi) = M_{\mathcal{B}}(\varphi), \quad M_{\mathcal{B}^*}(f^\top) = M_{\mathcal{B}}(f)^\top,$$

e a_φ è invertibile (per cui anche $M_{\mathcal{B}}(\varphi)$ lo è), si conclude che:

$$M_{\mathcal{B}}(\varphi)M_{\mathcal{B}}(f_\varphi^\top) = M_{\mathcal{B}}(f)^\top M_{\mathcal{B}}(\varphi) \implies M_{\mathcal{B}}(f_\varphi^\top) = M_{\mathcal{B}}(\varphi)^{-1}M_{\mathcal{B}}(f)^\top M_{\mathcal{B}}(\varphi),$$

da cui la tesi. \square

Corollario 3.1. Sia φ un prodotto scalare di V . Se \mathcal{B} è una base ortonormale, φ è non degenere e $M_{\mathcal{B}}(f_\varphi^\top) = M_{\mathcal{B}}(f)^\top$.

Dimostrazione. Se \mathcal{B} è una base ortonormale, $M_{\mathcal{B}}(\varphi) = I_n$. Pertanto φ è non degenere. Allora, per la proposizione precedente:

$$M_{\mathcal{B}}(f_\varphi^\top) = M_{\mathcal{B}}(\varphi)^{-1}M_{\mathcal{B}}(f)^\top M_{\mathcal{B}}(\varphi) = M_{\mathcal{B}}(f)^\top.$$

\square

Proposizione 3.4. Sia φ un prodotto hermitiano non degenere di V . Sia $f \in \text{End}(V)$. Allora vale la seguente identità:

$$M_{\mathcal{B}}(f_\varphi^*) = M_{\mathcal{B}}(\varphi)^{-1}M_{\mathcal{B}}(f)^*M_{\mathcal{B}}(\varphi),$$

dove \mathcal{B} è una base di V .

Dimostrazione. Sia $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$. Dal momento che φ è non degenere, $\text{Ker } M_{\mathcal{B}}(\varphi) = V^\perp = \{\underline{0}\}$, e quindi $M_{\mathcal{B}}(\varphi)$ è invertibile.

Dacché allora $\varphi(f^*(\underline{v}), \underline{w}) = \varphi(\underline{v}, f(\underline{w})) \forall \underline{v}, \underline{w} \in V$, vale la seguente identità:

$$[f^*(\underline{v})]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) [\underline{w}]_{\mathcal{B}} = [\underline{v}]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) [f(\underline{w})]_{\mathcal{B}},$$

ossia si deduce che:

$$[\underline{v}]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(f^*)^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) [\underline{w}]_{\mathcal{B}} = [\underline{v}]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) M_{\mathcal{B}}(f) [\underline{w}]_{\mathcal{B}}.$$

Sostituendo allora a \underline{v} e \underline{w} i vettori della base \mathcal{B} , si ottiene che:

$$\begin{aligned} (M_{\mathcal{B}}(f^*)^* M_{\mathcal{B}}(\varphi))_{ij} &= [\underline{v}_i]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(f^*)^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) [\underline{v}_j]_{\mathcal{B}} = \\ &= [\underline{v}_i]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) M_{\mathcal{B}}(f) [\underline{v}_j]_{\mathcal{B}} = (M_{\mathcal{B}}(\varphi) M_{\mathcal{B}}(f))_{ij}, \end{aligned}$$

e quindi che $M_{\mathcal{B}}(f^*)^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) = M_{\mathcal{B}}(\varphi) M_{\mathcal{B}}(f)$. Moltiplicando a destra per l'inversa di $M_{\mathcal{B}}(\varphi)$ e prendendo l'aggiunta di ambo i membri (ricordando che $M_{\mathcal{B}}(\varphi)^* = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$, essendo φ un prodotto hermitiano), si ricava l'identità desiderata. \square

Corollario 3.2. Sia φ un prodotto hermitiano di V spazio vettoriale su \mathbb{C} . Se \mathcal{B} è una base ortonormale, φ è non degenere e $M_{\mathcal{B}}(f_{\varphi}^*) = M_{\mathcal{B}}(f)^*$.

Dimostrazione. Se \mathcal{B} è una base ortonormale, $M_{\mathcal{B}}(\varphi) = I_n$. Pertanto φ è non degenere. Allora, per la proposizione precedente:

$$M_{\mathcal{B}}(f_{\varphi}^*) = M_{\mathcal{B}}(\varphi)^{-1} M_{\mathcal{B}}(f)^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) = M_{\mathcal{B}}(f)^*.$$

□

Nota. D'ora in poi, nel corso del documento, s'intenderà per φ un prodotto scalare (o eventualmente hermitiano) non degenere di V .

Definizione. (operatori simmetrici) Sia $f \in \text{End}(V)$. Si dice allora che f è **simmetrico** (o *autoaggiunto*) se $f = f^{\top}$.

Definizione. (applicazioni e matrici ortogonali) Sia $f \in \text{End}(V)$. Si dice allora che f è **ortogonale** se $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \varphi(f(\underline{v}), f(\underline{w}))$, ossia se è un'isometria in V . Sia $A \in M(n, \mathbb{K})$. Si dice dunque che A è **ortogonale** se $A^{\top} A = A A^{\top} = I_n$.

Definizione. Le matrici ortogonali di $M(n, \mathbb{K})$ formano un sottogruppo moltiplicativo di $GL(n, \mathbb{K})$, detto **gruppo ortogonale**, e indicato con O_n . Il sottogruppo di O_n contenente solo le matrici con determinante pari a 1 è detto **gruppo ortogonale speciale**, e si denota con SO_n .

Osservazione. Si possono classificare in modo semplice alcuni di questi gruppi ortogonali per $\mathbb{K} = \mathbb{R}$.

► $A \in O_n \implies 1 = \det(I_n) = \det(AA^{\top}) = \det(A)^2 \implies \det(A) = \pm 1$.

► $A = (a) \in O_1 \iff A^{\top} A = I_1 \iff a^2 = 1 \iff a = \pm 1$, da cui si ricava che l'unica matrice di SO_1 è (1). Si osserva inoltre che O_1 è abeliano di ordine 2, e quindi che $O_1 \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$.

► $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in O_2 \iff \begin{pmatrix} a^2 + b^2 & ab + cd \\ ab + cd & c^2 + d^2 \end{pmatrix} = A^{\top} A = I_2$.

Pertanto deve essere soddisfatto il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} a^2 + b^2 = c^2 + d^2 = 1, \\ ac + bd = 0. \end{cases}$$

Si ricava dunque che si può identificare A con le funzioni trigonometriche $\cos(\theta)$ e $\sin(\theta)$ con $\theta \in [0, 2\pi)$ nelle due forme:

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\det(A) = 1, A \in SO_2),$$

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \sin(\theta) & -\cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\det(A) = -1).$$

Definizione. (applicazioni e matrici hermitiane) Sia $f \in \text{End}(V)$ e si consideri il prodotto hermitiano φ . Si dice allora che f è **hermitiano** se $f = f^*$. Sia $A \in M(n, \mathbb{C})$. Si dice dunque che A è **hermitiana** se $A = A^*$.

Definizione. (applicazioni e matrici unitarie) Sia $f \in \text{End}(V)$ e si consideri il prodotto hermitiano φ . Si dice allora che f è **unitario** se $\varphi(v, w) = \varphi(f(v), f(w))$. Sia $A \in M(n, \mathbb{C})$. Si dice dunque che A è **unitaria** se $A^*A = AA^* = I_n$.

Definizione. Le matrici unitarie di $M(n, \mathbb{C})$ formano un sottogruppo moltiplicativo di $\text{GL}(n, \mathbb{C})$, detto **gruppo unitario**, e indicato con U_n . Il sottogruppo di U_n contenente solo le matrici con determinante pari a 1 è detto **gruppo unitario speciale**, e si denota con SU_n .

Osservazione.

Si possono classificare in modo semplice alcuni di questi gruppi unitari.

- ▶ $A \in U_n \implies 1 = \det(I_n) = \det(AA^*) = \det(A)\overline{\det(A)} = |\det(A)|^2 = 1$.
- ▶ $A = (a) \in U_1 \iff A^*A = I_1 \iff |a|^2 = 1 \iff a = e^{i\theta}, \theta \in [0, 2\pi)$, ossia il numero complesso a appartiene alla circonferenza di raggio unitario.
- ▶ $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in SU_2 \iff AA^* = \begin{pmatrix} |a|^2 + |b|^2 & a\bar{c} + b\bar{d} \\ \bar{a}c + \bar{b}d & |c|^2 + |d|^2 \end{pmatrix} = I_2, \det(A) = 1$, ossia se il seguente sistema di equazioni è soddisfatto:

$$\begin{cases} |a|^2 + |b|^2 = |c|^2 + |d|^2 = 1, \\ a\bar{c} + b\bar{d} = 0, \\ ad - bc = 1, \end{cases}$$

le cui soluzioni riassumono il gruppo SU_2 nel seguente modo:

$$SU_2 = \left\{ \begin{pmatrix} x & -y \\ \bar{y} & \bar{x} \end{pmatrix} \in M(2, \mathbb{C}) \mid |x|^2 + |y|^2 = 1 \right\}.$$

Definizione. (spazio euclideo reale) Si definisce **spazio euclideo reale** uno spazio vettoriale V su \mathbb{R} dotato del prodotto scalare standard $\varphi = \langle \cdot, \cdot \rangle$.

Definizione. (spazio euclideo complesso) Si definisce **spazio euclideo complesso** uno spazio vettoriale V su \mathbb{C} dotato del prodotto hermitiano standard $\varphi = \langle \cdot, \cdot \rangle$.

Proposizione 3.5. Sia (V, φ) uno spazio euclideo reale e sia \mathcal{B} una base ortonormale di V . Allora $f \in \text{End}(V)$ è simmetrico $\iff M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} \iff M_{\mathcal{B}}(f)$ è simmetrica.

Dimostrazione. Per il corollario precedente, f è simmetrico $\iff f = f^{\top} \iff M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(f^{\top}) = M_{\mathcal{B}}(f)^{\top}$. \square

Proposizione 3.6. Sia (V, φ) uno spazio euclideo reale e sia \mathcal{B} una base ortonormale di V . Allora $f \in \text{End}(V)$ è ortogonale $\iff M_{\mathcal{B}}(f)M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} = M_{\mathcal{B}}(f)^{\top}M_{\mathcal{B}}(f) = I_n \stackrel{\text{def}}{\iff} M_{\mathcal{B}}(f)$ è ortogonale.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

Dimostrazione. Si osserva che $M_{\mathcal{B}}(\varphi) = I_n$. Sia $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$. Se f è ortogonale, allora $[v]_{\mathcal{B}}^{\top} [w]_{\mathcal{B}} = [v]_{\mathcal{B}}^{\top} M_{\mathcal{B}}(\varphi) [w]_{\mathcal{B}} = \varphi(v, w) = \varphi(f(v), f(w)) = (M_{\mathcal{B}}(f)[v]_{\mathcal{B}})^{\top} M_{\mathcal{B}}(\varphi) (M_{\mathcal{B}}(f)[w]_{\mathcal{B}}) = [v]_{\mathcal{B}}^{\top} M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} M_{\mathcal{B}}(\varphi) M_{\mathcal{B}}(f) [w]_{\mathcal{B}} = [v]_{\mathcal{B}}^{\top} M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} M_{\mathcal{B}}(f) [w]_{\mathcal{B}}$. Allora, come visto nel corollario precedente, si ricava che $M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} M_{\mathcal{B}}(f) = I_n$. Dal momento che gli inversi sinistri sono anche inversi destri, $M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(f) M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} = I_n$.

Se invece $M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(f) M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} = I_n$, $\varphi(v, w) = [v]_{\mathcal{B}}^{\top} [w]_{\mathcal{B}} = [v]_{\mathcal{B}}^{\top} M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} M_{\mathcal{B}}(f) [w]_{\mathcal{B}} = (M_{\mathcal{B}}(f)[v]_{\mathcal{B}})^{\top} (M_{\mathcal{B}}(f)[w]_{\mathcal{B}}) = (M_{\mathcal{B}}(f)[v]_{\mathcal{B}})^{\top} M_{\mathcal{B}}(\varphi) (M_{\mathcal{B}}(f)[w]_{\mathcal{B}}) = \varphi(f(v), f(w))$, e quindi f è ortogonale. \square

Proposizione 3.7. Sia (V, φ) uno spazio euclideo complesso e sia \mathcal{B} una base ortonormale di V . Allora $f \in \text{End}(V)$ è hermitiano $\iff M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(f)^*$ $\stackrel{\text{def}}{\iff} M_{\mathcal{B}}(f)$ è hermitiana.

Dimostrazione. Per il corollario precedente, f è hermitiana $\iff f = f^*$ $\iff M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(f^*) = M_{\mathcal{B}}(f)^*$. \square

Proposizione 3.8. Sia (V, φ) uno spazio euclideo complesso e sia \mathcal{B} una base ortonormale di V . Allora $f \in \text{End}(V)$ è unitario $\iff M_{\mathcal{B}}(f) M_{\mathcal{B}}(f)^* = M_{\mathcal{B}}(f)^* M_{\mathcal{B}}(f) = I_n$ $\stackrel{\text{def}}{\iff} M_{\mathcal{B}}(f)$ è unitaria.

Dimostrazione. Si osserva che $M_{\mathcal{B}}(\varphi) = I_n$. Sia $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$. Se f è unitario, allora $[v]_{\mathcal{B}}^* [w]_{\mathcal{B}} = [v]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) [w]_{\mathcal{B}} = \varphi(v, w) = \varphi(f(v), f(w)) = (M_{\mathcal{B}}(f)[v]_{\mathcal{B}})^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) (M_{\mathcal{B}}(f)[w]_{\mathcal{B}}) = [v]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(f)^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) M_{\mathcal{B}}(f) [w]_{\mathcal{B}} = [v]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(f)^* M_{\mathcal{B}}(f) [w]_{\mathcal{B}}$. Allora, come visto nel corollario precedente, si ricava che $M_{\mathcal{B}}(f)^* M_{\mathcal{B}}(f) = I_n$. Dal momento che gli inversi sinistri sono anche inversi destri, $M_{\mathcal{B}}(f)^* M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(f) M_{\mathcal{B}}(f)^* = I_n$.

Se invece $M_{\mathcal{B}}(f)^* M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(f) M_{\mathcal{B}}(f)^* = I_n$, $\varphi(v, w) = [v]_{\mathcal{B}}^* [w]_{\mathcal{B}} = [v]_{\mathcal{B}}^* M_{\mathcal{B}}(f)^* M_{\mathcal{B}}(f) [w]_{\mathcal{B}} = (M_{\mathcal{B}}(f)[v]_{\mathcal{B}})^* (M_{\mathcal{B}}(f)[w]_{\mathcal{B}}) = (M_{\mathcal{B}}(f)[v]_{\mathcal{B}})^* M_{\mathcal{B}}(\varphi) (M_{\mathcal{B}}(f)[w]_{\mathcal{B}}) = \varphi(f(v), f(w))$, e quindi f è unitario. \square

Osservazione. Se \mathcal{B} è una base ortonormale di (V, φ) , ricordando che $M_{\mathcal{B}}(f^{\top}) = M_{\mathcal{B}}(f)^{\top}$ e che $M_{\mathcal{B}}(f^*) = M_{\mathcal{B}}(f)^*$, sono equivalenti allora i seguenti fatti:

- ▶ $f \circ f^{\top} = f^{\top} \circ f = \text{Id}_V \iff M_{\mathcal{B}}(f)$ è ortogonale $\iff f$ è ortogonale,
- ▶ $f \circ f^* = f^* \circ f = \text{Id}_V \iff M_{\mathcal{B}}(f)$ è unitaria $\iff f$ è unitario (se V è uno spazio vettoriale su \mathbb{C}).

Proposizione 3.9. Sia $V = \mathbb{R}^n$ uno spazio vettoriale col prodotto scalare standard φ . Allora sono equivalenti i seguenti fatti:

- (i) $A \in O_n$,

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

- (ii) f_A è un operatore ortogonale,
- (iii) le colonne e le righe di A formano una base ortonormale di V .

Dimostrazione. Sia \mathcal{B} la base canonica di V . Allora $M_{\mathcal{B}}(f_A) = A$, e quindi, per una proposizione precedente, f_A è un operatore ortogonale. Viceversa si deduce che se f_A è un operatore ortogonale, $A \in O_n$. Dunque è sufficiente dimostrare che $A \in O_n \iff$ le colonne e le righe di A formano una base ortonormale di V .

(\implies) Se $A \in O_n$, in particolare $A \in GL(n, \mathbb{R})$, e quindi A è invertibile. Allora le sue colonne e le sue righe formano già una base di V , essendo n vettori di V linearmente indipendenti. Inoltre, poiché $A \in O_n$, $\varphi(\underline{e}_i, \underline{e}_j) = \varphi(A\underline{e}_i, A\underline{e}_j)$, e quindi le colonne di A si mantengono a due a due ortogonali tra di loro, mentre $\varphi(A\underline{e}_i, A\underline{e}_i) = \varphi(\underline{e}_i, \underline{e}_i) = 1$. Pertanto le colonne di A formano una base ortonormale di V .

Si osserva che anche $A^{\top} \in O_n$. Allora le righe di A , che non sono altro che le colonne di A^{\top} , formano anch'esse una base ortonormale di V .

(\impliedby) Nel moltiplicare A^{\top} con A altro non si sta facendo che calcolare il prodotto scalare φ tra ogni riga di A^{\top} e ogni colonna di A , ossia $(A^*A)_{ij} = \varphi((A^{\top})_i, A^j) = \varphi(A^i, A^j) = \delta_{ij}$. Quindi $A^{\top}A = AA^{\top} = I_n$, da cui si deduce che $A \in O_n$. \square

Proposizione 3.10. Sia $V = \mathbb{C}^n$ uno spazio vettoriale col prodotto hermitiano standard φ . Allora sono equivalenti i seguenti fatti:

- (i) $A \in U_n$,
- (ii) f_A è un operatore unitario,
- (iii) le colonne e le righe di A formano una base ortonormale di V .

Dimostrazione. Sia \mathcal{B} la base canonica di V . Allora $M_{\mathcal{B}}(f_A) = A$, e quindi, per una proposizione precedente, f_A è un operatore unitario. Viceversa si deduce che se f_A è un operatore unitario, $A \in U_n$. Dunque è sufficiente dimostrare che $A \in U_n \iff$ le colonne e le righe di A formano una base ortonormale di V .

(\implies) Se $A \in U_n$, in particolare $A \in GL(n, \mathbb{R})$, e quindi A è invertibile. Allora le sue colonne e le sue righe formano già una base di V , essendo n vettori di V linearmente indipendenti. Inoltre, poiché $A \in U_n$, $\varphi(\underline{e}_i, \underline{e}_j) = \varphi(A\underline{e}_i, A\underline{e}_j)$, e quindi le colonne di A si mantengono a due a due ortogonali tra di loro, mentre $\varphi(A\underline{e}_i, A\underline{e}_i) = \varphi(\underline{e}_i, \underline{e}_i) = 1$. Pertanto le colonne di A formano una base ortonormale di V .

Si osserva che anche $A^{\top} \in U_n$. Allora le righe di A , che non sono altro che le colonne di A^{\top} , formano anch'esse una base ortonormale di V .

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

(\Leftarrow) Nel moltiplicare A^* con A altro non si sta facendo che calcolare il prodotto hermitiano φ tra ogni riga coniugata di A^* e ogni colonna di A , ossia $(A^*A)_{ij} = \varphi((A^\top)_i, A^j) = \varphi(A^i, A^j) = \delta_{ij}$. Quindi $A^*A = AA^* = I_n$, da cui si deduce che $A \in U_n$. \square

Proposizione 3.11. Sia (V, φ) uno spazio euclideo reale. Allora valgono i seguenti tre risultati:

- (i) $(V_{\mathbb{C}}, \varphi_{\mathbb{C}})$ è uno spazio euclideo complesso.
- (ii) Se $f \in \text{End}(V)$ è simmetrico, allora $f_{\mathbb{C}} \in \text{End}(V)$ è hermitiano.
- (iii) Se $f \in \text{End}(V)$ è ortogonale, allora $f_{\mathbb{C}} \in \text{End}(V)$ è unitario.

Dimostrazione. Dacché φ è il prodotto scalare standard dello spazio euclideo reale V , esiste una base ortonormale di V . Sia allora \mathcal{B} una base ortonormale di V . Si dimostrano i tre risultati separatamente.

- È sufficiente dimostrare che $\varphi_{\mathbb{C}}$ altro non è che il prodotto hermitiano standard. Come si è già osservato precedentemente, $M_{\mathcal{B}}(\varphi_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$, e quindi, dacché $M_{\mathcal{B}}(\varphi) = I_n$, essendo \mathcal{B} ortonormale, vale anche che $M_{\mathcal{B}}(\varphi_{\mathbb{C}}) = I_n$, ossia $\varphi_{\mathbb{C}}$ è proprio il prodotto hermitiano standard.
- Poiché f è simmetrico, $M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(f)^\top$, e quindi anche $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^\top$. Dal momento che $M_{\mathcal{B}}(f) \in M(n, \mathbb{R})$, $M_{\mathcal{B}}(f) = \overline{M_{\mathcal{B}}(f)} \implies M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^\top = M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^*$. Quindi $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^*$, ossia $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})$ è hermitiana, e pertanto anche $f_{\mathbb{C}}$ è hermitiano.
- Poiché f è ortogonale, $M_{\mathcal{B}}(f)M_{\mathcal{B}}(f)^\top = I_n$, e quindi anche $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^\top = I_n$. Allora, come prima, si deduce che $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^\top = M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^*$, essendo $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(f) \in M(n, \mathbb{R})$, da cui si ricava che $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^* = M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^\top = I_n$, ossia che $f_{\mathbb{C}}$ è unitario. \square

Esercizio 2. Sia (V, φ) uno spazio euclideo reale. Allora valgono i seguenti risultati:

- Se $f, g \in \text{End}(V)$ commutano, allora anche $f_{\mathbb{C}}, g_{\mathbb{C}} \in \text{End}(V_{\mathbb{C}})$ commutano.
- Se $f \in \text{End}(V)$, $(f^\top)_{\mathbb{C}} = (f_{\mathbb{C}})^*$.
- Se $f \in \text{End}(V)$, f diagonalizzabile $\iff f^\top$ diagonalizzabile.

Soluzione. Dacché φ è il prodotto scalare standard dello spazio euclideo reale V , esiste una base ortonormale $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ di V . Si dimostrano allora separatamente i tre risultati.

- Si osserva che $M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})M_{\mathcal{B}}(g_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(f)M_{\mathcal{B}}(g) = M_{\mathcal{B}}(g)M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}}(g_{\mathbb{C}})M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})$, e quindi che $f_{\mathbb{C}} \circ g_{\mathbb{C}} = g_{\mathbb{C}} \circ f_{\mathbb{C}}$.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

- Si osserva che $M_{\mathcal{B}}(f) \in M(n, \mathbb{R}) \implies M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} = M_{\mathcal{B}}(f)^*$, e quindi che $M_{\mathcal{B}}((f^{\top})_{\mathbb{C}}) = M_{\mathcal{B}}(f^{\top}) = M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} = M_{\mathcal{B}}(f)^* = M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}})^* = M_{\mathcal{B}}((f_{\mathbb{C}})^*)$. Allora $(f^{\top})_{\mathbb{C}} = (f_{\mathbb{C}})^*$.
- Poiché \mathcal{B} è ortonormale, $M_{\mathcal{B}}(f^{\top}) = M_{\mathcal{B}}(f)^{\top}$. Allora, se f è diagonalizzabile, anche $M_{\mathcal{B}}(f)$ lo è, e quindi $\exists P \in GL(n, \mathbb{K}), D \in M(n, \mathbb{K})$ diagonale tale che $M_{\mathcal{B}}(f) = PDP^{-1}$. Allora $M_{\mathcal{B}}(f^{\top}) = M_{\mathcal{B}}(f)^{\top} = (P^{\top})^{-1}D^{\top}P^{\top}$ è simile ad una matrice diagonale, e pertanto $M_{\mathcal{B}}(f^{\top})$ è diagonalizzabile. Allora anche f^{\top} è diagonalizzabile. Vale anche il viceversa considerando l'identità $f = (f^{\top})^{\top}$ e l'implicazione appena dimostrata.

Nota. D'ora in poi, qualora non specificato diversamente, si assumerà che V sia uno spazio euclideo, reale o complesso.

Definizione. (norma euclidea) Sia (V, φ) un qualunque spazio euclideo. Si definisce **norma** la mappa $\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}^+$ tale che $\|\underline{v}\| = \sqrt{\varphi(\underline{v}, \underline{v})}$.

Definizione. (distanza euclidea tra due vettori) Sia (V, φ) un qualunque spazio euclideo. Si definisce **distanza** la mappa $d : V \times V \rightarrow \mathbb{R}^+$ tale che $d(\underline{v}, \underline{w}) = \|\underline{v} - \underline{w}\|$.

Osservazione.

► Si osserva che in effetti $\varphi(\underline{v}, \underline{v}) \in \mathbb{R}^+ \forall \underline{v} \in V$. Infatti, sia per il caso reale che per il caso complesso, φ è definito positivo.

► Vale che $\|\underline{v}\| = 0 \iff \underline{v} = \underline{0}$. Infatti, se $\underline{v} = \underline{0}$, chiaramente $\varphi(\underline{v}, \underline{v}) = 0 \implies \|\underline{v}\| = 0$; se invece $\|\underline{v}\| = 0$, $\varphi(\underline{v}, \underline{v}) = 0$, e quindi $\underline{v} = \underline{0}$, dacché $V^{\perp} = \{\underline{0}\}$, essendo φ definito positivo.

► Inoltre, vale chiaramente che $\|\alpha \underline{v}\| = |\alpha| \|\underline{v}\|$.

► Se f è un operatore ortogonale (o unitario), allora f mantiene sia le norme che le distanze tra vettori. Infatti $\|\underline{v} - \underline{w}\|^2 = \varphi(\underline{v} - \underline{w}, \underline{v} - \underline{w}) = \varphi(f(\underline{v} - \underline{w}), f(\underline{v} - \underline{w})) = \varphi(f(\underline{v}) - f(\underline{w}), f(\underline{v}) - f(\underline{w})) = \|f(\underline{v}) - f(\underline{w})\|^2$, da cui segue che $\|\underline{v} - \underline{w}\| = \|f(\underline{v}) - f(\underline{w})\|$.

Proposizione 3.12 (disuguaglianza di Cauchy-Schwarz). Vale che $\|\underline{v}\| \|\underline{w}\| \geq |\varphi(\underline{v}, \underline{w})|$, $\forall \underline{v}, \underline{w} \in V$, dove l'uguaglianza è raggiunta soltanto se \underline{v} e \underline{w} sono linearmente dipendenti.

Dimostrazione. Si consideri innanzitutto il caso $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, e quindi il caso in cui φ è il prodotto scalare standard. Siano $\underline{v}, \underline{w} \in V$. Si consideri la disuguaglianza $\|\underline{v} + t\underline{w}\|^2 \geq 0$, valida per ogni elemento di V . Allora $\|\underline{v} + t\underline{w}\|^2 = \|\underline{v}\|^2 + 2\varphi(\underline{v}, \underline{w})t + \|\underline{w}\|^2 t^2 \geq 0$. L'ultima disuguaglianza è possibile se e solo se $\frac{\Delta}{4} \leq 0$, e quindi se e solo se $\varphi(\underline{v}, \underline{w})^2 - \|\underline{v}\|^2 \|\underline{w}\|^2 \leq 0 \iff \|\underline{v}\| \|\underline{w}\| \geq \varphi(\underline{v}, \underline{w})$. Vale in particolare l'equivalenza se e solo se $\|\underline{v} + t\underline{w}\| = 0$, ossia se $\underline{v} + t\underline{w} = \underline{0}$, da cui la tesi.

Si consideri ora il caso $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, e dunque il caso in cui φ è il prodotto hermitiano standard. Siano $\underline{v}, \underline{w} \in V$, e siano $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$. Si consideri allora la disuguaglianza $\|\alpha \underline{v} + \beta \underline{w}\|^2 \geq 0$, valida per ogni elemento di V . Allora $\|\alpha \underline{v} + \beta \underline{w}\|^2 = \|\alpha \underline{v}\|^2 + \varphi(\alpha \underline{v}, \beta \underline{w}) + \varphi(\beta \underline{w}, \alpha \underline{v}) +$

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

$\|\beta \underline{w}\|^2 = |\alpha|^2 \|\underline{v}\|^2 + \bar{\alpha}\beta \varphi(\underline{v}, \underline{w}) + \alpha\bar{\beta} \varphi(\underline{w}, \underline{v}) + |\beta|^2 \|\underline{w}\|^2 \geq 0$. Ponendo allora $\alpha = \|\underline{w}\|^2$ e $\beta = -\varphi(\underline{w}, \underline{v}) = -\varphi(\underline{v}, \underline{w})$, si deduce che:

$$\|\underline{v}\|^2 \|\underline{w}\|^4 - \|\underline{w}\|^2 |\varphi(\underline{v}, \underline{w})| \geq 0.$$

Se $\underline{w} = \underline{0}$, la disuguaglianza di Cauchy-Schwarz è già dimostrata. Altrimenti, è sufficiente dividere per $\|\underline{w}\|^2$ (dal momento che $\underline{w} \neq \underline{0} \iff \|\underline{w}\| \neq 0$) per ottenere la tesi. Come prima, si osserva che l'uguaglianza si ottiene se e solo se \underline{v} e \underline{w} sono linearmente dipendenti. \square

Proposizione 3.13 (disuguaglianza triangolare). $\|\underline{v} + \underline{w}\| \leq \|\underline{v}\| + \|\underline{w}\|$.

Dimostrazione. Si osserva che $\|\underline{v} + \underline{w}\|^2 = \|\underline{v}\|^2 + \varphi(\underline{v}, \underline{w}) + \varphi(\underline{w}, \underline{v}) + \|\underline{w}\|^2$. Se φ è il prodotto scalare standard, si ricava che:

$$\|\underline{v} + \underline{w}\|^2 = \|\underline{v}\|^2 + 2\varphi(\underline{v}, \underline{w}) + \|\underline{w}\|^2 \leq \|\underline{v}\|^2 + 2\|\underline{v}\| \|\underline{w}\| + \|\underline{w}\|^2 = (\|\underline{v}\| + \|\underline{w}\|)^2,$$

dove si è utilizzata la disuguaglianza di Cauchy-Schwarz. Da quest'ultima disuguaglianza si ricava, prendendo la radice quadrata, la disuguaglianza desiderata.

Se invece φ è il prodotto hermitiano standard, $\|\underline{v} + \underline{w}\|^2 = \|\underline{v}\|^2 + 2\Re(\varphi(\underline{v}, \underline{w})) + \|\underline{w}\|^2 \leq \|\underline{v}\|^2 + 2|\varphi(\underline{v}, \underline{w})| + \|\underline{w}\|^2$. Allora, riapplicando la disuguaglianza di Cauchy-Schwarz, si ottiene che:

$$\|\underline{v} + \underline{w}\|^2 \leq (\|\underline{v}\| + \|\underline{w}\|)^2,$$

da cui, come prima, si ottiene la disuguaglianza desiderata. \square

Osservazione. Utilizzando il concetto di norma euclidea, si possono ricavare due teoremi fondamentali della geometria, e già noti dalla geometria euclidea.

- Se $\underline{v} \perp \underline{w}$, allora $\|\underline{v} + \underline{w}\|^2 = \|\underline{v}\|^2 + \overbrace{(\varphi(\underline{v}, \underline{w}) + \varphi(\underline{w}, \underline{v}))}^{=0} + \|\underline{w}\|^2 = \|\underline{v}\|^2 + \|\underline{w}\|^2$ (teorema di Pitagora),
- Se $\|\underline{v}\| = \|\underline{w}\|$ e φ è un prodotto scalare, allora $\varphi(\underline{v} + \underline{w}, \underline{v} - \underline{w}) = \|\underline{v}\|^2 - \varphi(\underline{v}, \underline{w}) + \varphi(\underline{w}, \underline{v}) - \|\underline{w}\|^2 = \|\underline{v}\|^2 - \|\underline{w}\|^2 = 0$, e quindi $\underline{v} + \underline{w} \perp \underline{v} - \underline{w}$ (le diagonali di un rombo sono ortogonali tra loro).

Osservazione. Sia $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ è una base ortogonale di V per φ .

- Se $\underline{v} = a_1 \underline{v}_1 + \dots + a_n \underline{v}_n$, con $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{K}$, si osserva che $\varphi(\underline{v}, \underline{v}_i) = a_i \varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_i)$. Quindi $\underline{v} = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi(\underline{v}, \underline{v}_i)}{\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_i)} \underline{v}_i$. In particolare, $\frac{\varphi(\underline{v}, \underline{v}_i)}{\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_i)}$ è detto **coefficiente di Fourier** di \underline{v} rispetto a \underline{v}_i , e si indica con $C(\underline{v}, \underline{v}_i)$. Se \mathcal{B} è ortonormale, $\underline{v} = \sum_{i=1}^n \varphi(\underline{v}, \underline{v}_i) \underline{v}_i$.
- Quindi $\|\underline{v}\|^2 = \varphi(\underline{v}, \underline{v}) = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi(\underline{v}, \underline{v}_i)^2}{\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_i)}$. In particolare, se \mathcal{B} è ortonormale, $\|\underline{v}\|^2 = \sum_{i=1}^n \varphi(\underline{v}, \underline{v}_i)^2$. In tal caso, si può esprimere la disuguaglianza di Bessel: $\|\underline{v}\|^2 \geq \sum_{i=1}^k \varphi(\underline{v}, \underline{v}_i)^2$ per $k \leq n$.

Osservazione. (algoritmo di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt) Se φ è non degenera (o in generale, se $\text{CI}(\varphi) = \{0\}$) ed è data una base $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$ per V (dove si ricorda che deve valere $\text{char } \mathbb{K} \neq 2$), è possibile applicare l'**algoritmo di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt** per ottenere da \mathcal{B} una nuova base $\mathcal{B}' = \{\underline{v}_1', \dots, \underline{v}_n'\}$ con le seguenti proprietà:

- (i) \mathcal{B}' è una base ortogonale,
- (ii) \mathcal{B}' mantiene la stessa bandiera di \mathcal{B} (ossia $\text{Span}(v_1, \dots, v_i) = \text{Span}(\underline{v}_1', \dots, \underline{v}_i')$ per ogni $1 \leq i \leq n$).

L'algoritmo si applica nel seguente modo: si prenda in considerazione \underline{v}_1 e sottragga ad ogni altro vettore della base il vettore $C(\underline{v}_1, v_i)\underline{v}_1 = \frac{\varphi(\underline{v}_1, v_i)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)}\underline{v}_1$, rendendo ortogonale ogni altro vettore della base con \underline{v}_1 . Pertanto si applica la mappa $v_i \mapsto \underline{v}_i - \frac{\varphi(\underline{v}_1, v_i)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)}\underline{v}_1 = \underline{v}_i^{(1)}$. Si verifica infatti che \underline{v}_1 e $\underline{v}_i^{(1)}$ sono ortogonali per $2 \leq i \leq n$:

$$\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_i^{(1)}) = \varphi(\underline{v}_1, v_i) - \varphi\left(\underline{v}_1, \frac{\varphi(\underline{v}_1, v_i)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)}v_i\right) = \varphi(\underline{v}_1, v_i) - \varphi(\underline{v}_1, v_i) = 0.$$

Poiché \underline{v}_1 non è isotropo, si deduce la decomposizione $V = \text{Span}(\underline{v}_1) \oplus \text{Span}(\underline{v}_1)^\perp$. In particolare $\dim \text{Span}(\underline{v}_1)^\perp = n - 1$: essendo allora i vettori $\underline{v}_2^{(1)}, \dots, \underline{v}_n^{(1)}$ linearmente indipendenti e appartenenti a $\text{Span}(\underline{v}_1)^\perp$, ne sono una base. Si conclude quindi che vale la seguente decomposizione:

$$V = \text{Span}(\underline{v}_1) \oplus^\perp \text{Span}(\underline{v}_2^{(1)}, \dots, \underline{v}_n^{(1)}).$$

Si riapplica dunque l'algoritmo di Gram-Schmidt prendendo come spazio vettoriale lo spazio generato dai vettori a cui si è applicato precedentemente l'algoritmo, ossia $V' = \text{Span}(\underline{v}_2^{(1)}, \dots, \underline{v}_n^{(1)})$, fino a che non si ottiene $V' = \{0\}$.

Si può addirittura ottenere una base ortonormale a partire da \mathcal{B}' normalizzando ogni vettore (ossia dividendo per la propria norma), se si sta considerando uno spazio euclideo.

Osservazione. Poiché la base ottenuta tramite Gram-Schmidt mantiene la stessa bandiera della base di partenza, ogni matrice triangolabile è anche triangolabile mediante una base ortogonale.

Esempio. Si consideri $V = (\mathbb{R}^3, \langle \cdot, \cdot \rangle)$, ossia \mathbb{R}^3 dotato del prodotto scalare standard. Si applica l'algoritmo di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt sulla seguente base:

$$\mathcal{B} = \left\{ \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\underline{v}_1 = \underline{e}_1}, \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\underline{v}_2}, \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}}_{\underline{v}_3} \right\}.$$

Alla prima iterazione dell'algoritmo si ottengono i seguenti vettori:

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

$$\begin{aligned} \bullet \underline{v}_2^{(1)} &= \underline{v}_2 - \frac{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_2)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)} \underline{v}_1 = \underline{v}_2 - \underline{v}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \underline{e}_2, \\ \bullet \underline{v}_3^{(1)} &= \underline{v}_3 - \frac{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_3)}{\varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_1)} \underline{v}_1 = \underline{v}_3 - \underline{v}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Si considera ora $V' = \text{Span}(\underline{v}_2^{(1)}, \underline{v}_3^{(1)})$. Alla seconda iterazione dell'algoritmo si ottiene allora il seguente vettore:

$$\bullet \underline{v}_3^{(2)} = \underline{v}_3^{(1)} - \frac{\varphi(\underline{v}_2^{(1)}, \underline{v}_3^{(1)})}{\varphi(\underline{v}_2^{(1)}, \underline{v}_2^{(1)})} \underline{v}_2^{(1)} = \underline{v}_3^{(1)} - \underline{v}_2^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \underline{e}_3.$$

Quindi la base ottenuta è $\mathcal{B}' = \{\underline{e}_1, \underline{e}_2, \underline{e}_3\}$, ossia la base canonica di \mathbb{R}^3 , già ortonormale.

Osservazione. Si osserva adesso che se (V, φ) è uno spazio euclideo (e quindi $\varphi > 0$), e W è un sottospazio di V , vale la seguente decomposizione:

$$V = W \oplus W^\perp.$$

Pertanto ogni vettore $\underline{v} \in V$ può scriversi come $\underline{w} + \underline{w}'$ dove $\underline{w} \in W$ e $\underline{w}' \in W^\perp$, dove $\varphi(\underline{w}, \underline{w}') = 0$.

Definizione. (proiezione ortogonale) Si definisce l'applicazione $\text{pr}_W : V \rightarrow V$, detta **proiezione ortogonale** su W , in modo tale che $\text{pr}_W(\underline{v}) = \underline{w}$, dove $\underline{v} = \underline{w} + \underline{w}'$, con $\underline{w} \in W$ e $\underline{w}' \in W^\perp$.

Osservazione.

► Dacché la proiezione ortogonale è un caso particolare della classica applicazione lineare di proiezione su un sottospazio di una somma diretta, pr_W è un'applicazione lineare.

► Vale chiaramente che $\text{pr}_W^2 = \text{pr}_W$, da cui si ricava, se $W^\perp \neq \{0\}$, che $\varphi_{\text{pr}_W}(\lambda) = \lambda(\lambda - 1)$, ossia che $\text{sp}(\text{pr}_W) = \{0, 1\}$. Infatti $\text{pr}_W(\underline{v})$ appartiene già a W , ed essendo la scrittura in somma di due elementi, uno di W e uno di W^\perp , unica, $\text{pr}_W(\text{pr}_W(\underline{v})) = \text{pr}_W(\underline{v})$, da cui l'identità $\text{pr}_W^2 = \text{pr}_W$.

► Seguendo il ragionamento di prima, vale anche che $\text{pr}_W|_W = \text{Id}_W$ e che $\text{pr}_W|_{W^\perp} = 0$.

► Inoltre, vale la seguente riscrittura di $\underline{v} \in V$: $\underline{v} = \text{pr}_W(\underline{v}) + \text{pr}_{W^\perp}(\underline{v})$.

► Se $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ è una base ortogonale di W , allora $\text{pr}_W(\underline{v}) = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi(\underline{v}, \underline{v}_i)}{\varphi(\underline{v}_i, \underline{v}_i)} \underline{v}_i = \sum_{i=1}^n C(\underline{v}, \underline{v}_i) \underline{v}_i$. Infatti $\underline{v} - \sum_{i=1}^n C(\underline{v}, \underline{v}_i) \underline{v}_i \in W^\perp$.

► pr_W è un operatore simmetrico (o hermitiano se lo spazio è complesso). Infatti $\varphi(\text{pr}_W(\underline{v}), \underline{w}) = \varphi(\text{pr}_W(\underline{v}), \text{pr}_W(\underline{w}) + \text{pr}_{W^\perp}(\underline{w})) = \varphi(\text{pr}_W(\underline{v}), \text{pr}_W(\underline{w})) = \varphi(\text{pr}_W(\underline{v}) + \text{pr}_{W^\perp}(\underline{v}), \text{pr}_W(\underline{w})) = \varphi(\underline{v}, \text{pr}_W(\underline{w}))$.

Proposizione 3.14. Sia (V, φ) uno spazio euclideo. Allora valgono i seguenti risultati:

- (i) Siano $U, W \subseteq V$ sono sottospazi di V , allora $U \perp W$, ossia³ $U \subseteq W^\perp$, $\iff \text{pr}_U \circ \text{pr}_W = \text{pr}_W \circ \text{pr}_U = 0$.
- (ii) Sia $V = W_1 \oplus \dots \oplus W_n$. Allora $\underline{v} = \sum_{i=1}^n \text{pr}_{W_i}(\underline{v}) \iff W_i \perp W_j \ \forall i \neq j, 1 \leq i, j \leq n$.

Dimostrazione. Si dimostrano i due risultati separatamente.

- (i) Sia $\underline{v} \in V$. Allora $\text{pr}_W(\underline{v}) \in W = W^{\perp\perp} \subseteq U^\perp$. Pertanto $\text{pr}_U(\text{pr}_W(\underline{v})) = \underline{0}$. Analogamente $\text{pr}_W(\text{pr}_U(\underline{v})) = \underline{0}$, da cui la tesi.
- (ii) Sia vero che $\underline{v} = \sum_{i=1}^n \text{pr}_{W_i}(\underline{v}) \ \forall \underline{v} \in V$. Sia $\underline{w} \in W_j$. Allora $\underline{w} = \sum_{i=1}^n \text{pr}_{W_i}(\underline{w}) = \underline{w} + \sum_{i \neq j} \text{pr}_{W_i}(\underline{w}) \implies \text{pr}_{W_i}(\underline{w}) = \underline{0} \ \forall i \neq j$. Quindi $\underline{w} \in W_i^\perp \ \forall i \neq j$, e si conclude che $W_i \subseteq W_j^\perp \implies W_i \perp W_j$. Se invece $W_i \perp W_j \ \forall i \neq j$, sia $\mathcal{B}_i = \{\underline{w}_i^{(1)}, \dots, \underline{w}_i^{(k_i)}\}$ una base ortogonale di W_i . Allora $\mathcal{B} = \cup_{i=1}^n \mathcal{B}_i$ è anch'essa una base ortogonale di V , essendo $\varphi(\underline{w}_i^{(t_i)}, \underline{w}_j^{(t_j)}) = 0$ per ipotesi. Pertanto $\underline{v} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} C(\underline{v}, \underline{w}_i^{(j)}) \underline{w}_i^{(j)} = \sum_{i=1}^n \text{pr}_{W_i}(\underline{v})$, da cui la tesi. \square

Definizione. (inversione ortogonale) Si definisce l'applicazione $\rho_W : V \rightarrow V$, detta **inversione ortogonale**, in modo tale che, detto $\underline{v} = \underline{w} + \underline{w}' \in V$ con $\underline{w} \in W, \underline{w}' \in W^\perp$, $\rho_W(\underline{v}) = \underline{w} - \underline{w}'$. Se $\dim W = \dim V - 1$, si dice che ρ_W è una **riflessione**.

Osservazione.

- Si osserva che ρ_W è un'applicazione lineare.
- Vale l'identità $\rho_W^2 = \text{Id}_V$, da cui si ricava che $\varphi_{\rho_W}(\lambda) \mid (\lambda - 1)(\lambda + 1)$. In particolare, se $W^\perp \neq \{0\}$, vale proprio che $\text{sp}(\rho_W) = \{\pm 1\}$, dove $V_1 = W$ e $V_{-1} = W^\perp$.
- ρ_W è ortogonale (o unitaria, se V è uno spazio euclideo complesso). Infatti se $\underline{v}_1 = \underline{w}_1 + \underline{w}_1'$ e $\underline{v}_2 = \underline{w}_2 + \underline{w}_2'$, con $\underline{w}_1, \underline{w}_2 \in W$ e $\underline{w}_1', \underline{w}_2' \in W^\perp$, $\varphi(\rho_W(\underline{v}_1), \rho_W(\underline{v}_2)) = \varphi(\underline{w}_1 - \underline{w}_1', \underline{w}_2 - \underline{w}_2') = \varphi(\underline{w}_1, \underline{w}_2) - \underbrace{\varphi(\underline{w}_1', \underline{w}_2) + \varphi(\underline{w}_1, \underline{w}_2')}_{=0} + \varphi(\underline{w}_1', \underline{w}_2') = \varphi(\underline{w}_1 - \underline{w}_1', \underline{w}_2 - \underline{w}_2')$.

Quindi $\varphi(\rho_W(\underline{v}_1), \rho_W(\underline{v}_2)) = \varphi(\underline{w}_1, \underline{w}_2) + \varphi(\underline{w}_1', \underline{w}_2) + \varphi(\underline{w}_1, \underline{w}_2') + \varphi(\underline{w}_1', \underline{w}_2') = \varphi(\underline{v}_1, \underline{v}_2)$.

Lemma 3.1. Sia (V, φ) uno spazio euclideo reale. Siano $\underline{u}, \underline{w} \in V$. Se $\|\underline{u}\| = \|\underline{w}\|$, allora esiste un sottospazio W di dimensione $n - 1$ per cui la riflessione ρ_W relativa a φ è tale che $\rho_W(\underline{u}) = \underline{w}$.

Dimostrazione. Se \underline{v} e \underline{w} sono linearmente dipendenti, dal momento che $\|\underline{v}\| = \|\underline{w}\|$, deve valere anche che $\underline{v} = \underline{w}$. Sia $\underline{u} \neq \underline{0}, \underline{u} \in \text{Span}(\underline{v})^\perp$. Si consideri $U = \text{Span}(\underline{u})$: si osserva

³È sufficiente che valga $U \subseteq W^\perp$ affinché valga anche $W \subseteq U^\perp$. Infatti $U \subseteq W^\perp \implies W = W^{\perp\perp} \subseteq U^\perp$. Si osserva che in generale vale che $W \subseteq W^{\perp\perp}$, dove vale l'uguaglianza nel caso di un prodotto φ non degenere, com'è nel caso di uno spazio euclideo, essendo $\varphi > 0$ per ipotesi.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

che $\dim U = 1$ e che, essendo φ non degenere, $\dim U^\perp = n - 1$. Posto allora $W = U^\perp$, si ricava, sempre perché φ è non degenere, che $U = U^{\perp\perp} = W^\perp$. Si conclude pertanto che $\rho_W(\underline{v}) = \underline{v} = \underline{w}$.

Siano adesso \underline{v} e \underline{w} linearmente indipendenti e sia $U = \text{Span}(\underline{v} - \underline{w})$. Dal momento che $\dim U = 1$ e φ è non degenere, $\dim U^\perp = n - 1$. Sia allora $W = U^\perp$. Allora, come prima, $U = U^{\perp\perp} = W^\perp$. Si consideri dunque la riflessione ρ_W : dacché $\underline{v} = \frac{\underline{v} + \underline{w}}{2} + \frac{\underline{v} - \underline{w}}{2}$, e $\varphi(\frac{\underline{v} + \underline{w}}{2}, \frac{\underline{v} - \underline{w}}{2}) = \frac{\|\underline{v}\| - \|\underline{w}\|}{4} = 0$, \underline{v} è già decomposto in un elemento di W e in uno di W^\perp , per cui si conclude che $\rho_W(\underline{v}) = \frac{\underline{v} + \underline{w}}{2} - \frac{\underline{v} - \underline{w}}{2} = \underline{w}$, ottenendo la tesi. \square

Teorema 3.3 (di Cartan–Dieudonné). Sia (V, φ) uno spazio euclideo reale. Ogni isometria di V è allora prodotto di al più n riflessioni.

Dimostrazione. Si dimostra la tesi applicando il principio di induzione sulla dimensione n di V .

(*passo base*) Sia $n = 1$ e sia inoltre f un'isometria di V . Sia \underline{v}_1 l'unico elemento di una base ortonormale \mathcal{B} di V . Allora $\|f(\underline{v}_1)\| = \|\underline{v}_1\| = 1$, da cui si ricava che⁴ $f(\underline{v}_1) = \pm \underline{v}_1$, ossia che $f = \pm \text{Id}_V$. Se $f = \text{Id}_V$, f è un prodotto vuoto, e già verifica la tesi; altrimenti $f = \rho_{\{0\}}$, dove si considera $V = V \oplus^\perp \{0\}$. Pertanto f è prodotto di al più una riflessione.

(*passo induttivo*) Sia $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ una base di V . Sia f un'isometria di V . Si assuma inizialmente l'esistenza di \underline{v}_i tale per cui $f(\underline{v}_i) = \underline{v}_i$. Allora, detto $W = \text{Span}(\underline{v}_i)$, si può decomporre V come $W \oplus^\perp W^\perp$. Si osserva che W^\perp è f -invariante: infatti, se $\underline{u} \in W^\perp$, $\varphi(\underline{v}_i, f(\underline{u})) = \varphi(f(\underline{v}_i), f(\underline{u})) = \varphi(\underline{v}_i, \underline{u}) = 0 \implies f(\underline{u}) \in W^\perp$. Pertanto si può considerare l'isometria $f|_{W^\perp}$. Dacché $\dim W^\perp = n - 1$, per il passo induttivo esistono W_1, \dots, W_k sottospazi di W^\perp con $k \leq n - 1$ per cui $\rho_{W_1}, \dots, \rho_{W_k} \in \text{End}(W^\perp)$ sono tali che $f|_{W^\perp} = \rho_{W_1} \circ \dots \circ \rho_{W_k}$.

Si considerino allora le riflessioni $\rho_{W_1 \oplus^\perp W}, \dots, \rho_{W_k \oplus^\perp W}$. Si mostra che $\rho_{W_1 \oplus^\perp W} \circ \dots \circ \rho_{W_k \oplus^\perp W}|_W = \text{Id}_W = f|_W$. Affinché si faccia ciò è sufficiente mostrare che $(\rho_{W_1 \oplus^\perp W} \circ \dots \circ \rho_{W_k \oplus^\perp W})(\underline{v}_i) = \underline{v}_i$. Si osserva che $\underline{v}_i \in W_i \oplus^\perp W \forall 1 \leq i \leq k$, e quindi che $\rho_{W_k \oplus^\perp W}(\underline{v}_i) = \underline{v}_i$. Reiterando l'applicazione di questa identità nel prodotto, si ottiene infine il risultato desiderato. Infine, si dimostra che $\rho_{W_1 \oplus^\perp W} \circ \dots \circ \rho_{W_k \oplus^\perp W}|_{W^\perp} = \rho_{W_1} \circ \dots \circ \rho_{W_k} = f|_{W^\perp}$. Analogamente a prima, è sufficiente mostrare che $\rho_{W_k \oplus^\perp W}(\underline{u}) = \rho_{W_k}(\underline{u}) \forall \underline{u} \in W^\perp$. Sia $\underline{u} = \rho_{W_k}(\underline{u}) + \underline{u}'$ con $\underline{u}' \in W_k^\perp \cap W^\perp \subseteq (W_k \oplus^\perp W)^\perp$, ricordando che $W^\perp = W_k \oplus^\perp (W^\perp \cap W_k^\perp)$. Allora, poiché $\rho_{W_k}(\underline{u}) \in W_k \subseteq (W_k \oplus^\perp W)$, si conclude che $\rho_{W_k \oplus^\perp W}(\underline{u}) = \rho_{W_k}(\underline{u})$. Pertanto, dacché vale che $V = W \oplus^\perp W^\perp$ e che $\rho_{W_1 \oplus^\perp W} \circ \dots \circ \rho_{W_k \oplus^\perp W}$ e f , ristretti su W o su W^\perp , sono le stesse identiche mappe, allora in particolare vale l'uguaglianza più generale:

⁴Infatti, detto $\lambda \in \mathbb{R}$ tale che $f(\underline{v}_1) = \lambda \underline{v}_1$, $\|\underline{v}_1\| = \|f(\underline{v}_1)\| = \lambda^2 \|\underline{v}_1\| \implies \lambda = \pm 1$, ossia $f = \pm \text{Id}$, come volevasi dimostrare.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

$$f = \rho_{W_1 \oplus^\perp W} \circ \cdots \circ \rho_{W_k \oplus^\perp W},$$

e quindi f è prodotto di $k \leq n - 1$ riflessioni.

Se invece non esiste alcun \underline{v}_i tale per cui $f(\underline{v}_i) = \underline{v}_i$, per il *Lemma 1* esiste una riflessione τ tale per cui $\tau(f(\underline{v}_i)) = \underline{v}_i$. In particolare $\tau \circ f$ è anch'essa un'isometria, essendo composizione di due isometrie. Allora, da prima, esistono U_1, \dots, U_k sottospazi di V con $k \leq n - 1$ tali per cui $\tau \circ f = \rho_{U_1} \circ \cdots \circ \rho_{U_k}$, da cui $f = \tau \circ \rho_{U_1} \circ \cdots \circ \rho_{U_k}$, ossia f è prodotto di al più n riflessioni, concludendo il passo induttivo. \square

Lemma 3.1. Sia $f \in \text{End}(V)$ simmetrico (o hermitiano). Allora f ha solo autovalori reali⁵.

Dimostrazione. Si assuma che V è uno spazio euclideo complesso, e quindi che φ è un prodotto hermitiano. Allora, se f è hermitiano, sia $\lambda \in \mathbb{C}$ un suo autovalore⁶ e sia $\underline{v} \in V_\lambda$. Allora $\varphi(\underline{v}, f(\underline{v})) = \varphi(f(\underline{v}), \underline{v}) = \overline{\varphi(\underline{v}, f(\underline{v}))} \implies \varphi(\underline{v}, f(\underline{v})) \in \mathbb{R}$. Inoltre vale la seguente identità:

$$\varphi(\underline{v}, f(\underline{v})) = \varphi(\underline{v}, \lambda \underline{v}) = \lambda \varphi(\underline{v}, \underline{v}),$$

da cui, ricordando che φ è non degenera e che $\varphi(\underline{v}, \underline{v}) \in \mathbb{R}$, si ricava che:

$$\lambda = \frac{\varphi(\underline{v}, f(\underline{v}))}{\varphi(\underline{v}, \underline{v})} \in \mathbb{R}.$$

Sia ora invece V è uno spazio euclideo reale e φ è un prodotto scalare. Allora, $(V_{\mathbb{C}}, \varphi_{\mathbb{C}})$ è uno spazio euclideo complesso, e $f_{\mathbb{C}}$ è hermitiano. Sia \mathcal{B} una base di V . Allora, come visto all'inizio di questa dimostrazione, $f_{\mathbb{C}}$ ha solo autovalori reali, da cui si ricava che il polinomio caratteristico di $f_{\mathbb{C}}$ è completamente riducibile in \mathbb{R} . Si osserva inoltre che $p_f(\lambda) = \det(M_{\mathcal{B}}(f) - \lambda I_n) = \det(M_{\mathcal{B}}(f_{\mathbb{C}}) - \lambda I_n) = p_{f_{\mathbb{C}}}(\lambda)$. Si conclude dunque che anche p_f è completamente riducibile in \mathbb{R} . \square

Osservazione. Dal lemma precedente consegue immediatamente che se $A \in M(n, \mathbb{R})$ è simmetrica (o se appartiene a $M(n, \mathbb{C})$ ed è hermitiana), considerando l'operatore simmetrico f_A indotto da A in \mathbb{R}^n (o \mathbb{C}^n), f_A ha tutti autovalori reali, e dunque così anche A .

Lemma 3.2. Sia $f \in \text{End}(V)$ simmetrico (o hermitiano). Allora se λ, μ sono due autovalori distinti di f , $V_\lambda \perp V_\mu$.

⁵Nel caso di f simmetrico, si intende in particolare che tutte le radici del suo polinomio caratteristico sono reali.

⁶Tale autovalore esiste sicuramente dal momento che $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ è un campo algebricamente chiuso.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

Dimostrazione. Siano $\underline{v} \in V_\lambda$ e $\underline{w} \in V_\mu$. Allora⁷ $\lambda\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \varphi(\lambda\underline{v}, \underline{w}) = \varphi(f(\underline{v}), \underline{w}) = \varphi(\underline{v}, f(\underline{w})) = \varphi(\underline{v}, \mu\underline{w}) = \mu\varphi(\underline{v}, \underline{w})$. Pertanto vale la seguente identità:

$$(\lambda - \mu)\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0.$$

In particolare, valendo $\lambda - \mu \neq 0$ per ipotesi, $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0 \implies V_\lambda \perp V_\mu$, da cui la tesi. \square

Lemma 3.3. Sia $f \in \text{End}(V)$ simmetrico (o hermitiano). Se $W \subseteq V$ è f -invariante, allora anche W^\perp lo è.

Dimostrazione. Siano $\underline{w} \in W$ e $\underline{v} \in W^\perp$. Allora $\varphi(\underline{w}, f(\underline{v})) = \varphi(\underbrace{f(\underline{w})}_{\in W}, \underline{v}) = 0$, da cui si

ricava che $f(\underline{v}) \in W^\perp$, ossia la tesi. \square

Teorema 3.4 (spettrale reale). Sia (V, φ) uno spazio euclideo reale (o complesso) e sia $f \in \text{End}(V)$ simmetrico (o hermitiano). Allora esiste una base ortogonale \mathcal{B} di V composta di autovettori per f .

Dimostrazione. Siano $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ tutti gli autovalori reali di f . Sia inoltre $W = V_{\lambda_1} \oplus \dots \oplus V_{\lambda_k}$. Per i lemmi precedenti, vale che:

$$W = V_{\lambda_1} \oplus^\perp \dots \oplus^\perp V_{\lambda_k}.$$

Sicuramente $W \subset V$. Si assuma però che $W \subsetneq V$. Allora $V = W \oplus^\perp W^\perp$. In particolare, per il lemma precedente, W^\perp è f -invariante. Quindi $f|_{W^\perp}$ è un endomorfismo di uno spazio di dimensione non nulla. Si osserva che $f|_{W^\perp}$ è chiaramente simmetrico (o hermitiano), essendo solo una restrizione di f . Allora $f|_{W^\perp}$ ammette autovalori reali per i lemmi precedenti; tuttavia questo è un assurdo, dal momento che ogni autovalore di $f|_{W^\perp}$ è anche autovalore di f e si era supposto che⁸ $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ fossero tutti gli autovalori di f , \neq . Quindi $W = V$. Pertanto, detta \mathcal{B}_i una base ortonormale di V_{λ_i} , $\mathcal{B} = \cup_{i=1}^k \mathcal{B}_i$ è una base ortonormale di V , da cui la tesi. \square

Corollario 3.3 (teorema spettrale per le matrici). Sia $A \in M(n, \mathbb{R})$ simmetrica (o appartenente a $M(n, \mathbb{C})$ ed hermitiana). Allora $\exists P \in O_n$ (o $P \in U_n$) tale che $P^{-1}AP = P^\top AP$ (o $P^{-1}AP = P^*AP$ nel caso hermitiano) sia una matrice diagonale reale.

Dimostrazione. Si consideri f_A , l'operatore indotto dalla matrice A in \mathbb{R}^n (o \mathbb{C}^n). Allora f_A è un operatore simmetrico (o hermitiano) sul prodotto scalare (o hermitiano) standard. Pertanto, per il teorema spettrale reale, esiste una base ortonormale $\mathcal{B} = \{\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n\}$ composta di autovettori di f_A . In particolare, detta \mathcal{B}' la base canonica di \mathbb{R}^n (o \mathbb{C}^n), vale la seguente identità:

⁷Si osserva che non è stato coniugato λ nei passaggi algebrici, valendo $\lambda \in \mathbb{R}$ dallo scorso lemma.

⁸Infatti tale autovalore λ non può già comparire tra questi autovalori, altrimenti, detto $i \in \mathbb{N}$ tale che $\lambda = \lambda_i$, $V_{\lambda_i} \cap W^\perp \neq \{0\}$, violando la somma diretta supposta.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

$$M_{\mathcal{B}}(f) = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{Id})^{-1} M_{\mathcal{B}'}(f) M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{Id}),$$

dove $M_{\mathcal{B}'}(f) = A$, $M_{\mathcal{B}}(f)$ è diagonale, essendo \mathcal{B} composta di autovettori, e $P = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}$ si configura nel seguente modo:

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(f) = \left(\underline{v}_1 \mid \cdots \mid \underline{v}_n \right).$$

Dacché \mathcal{B} è ortogonale, P è anch'essa ortogonale, da cui la tesi. \square

Osservazione.

► Un importante risultato che consegue direttamente dal teorema spettrale per le matrici riguarda la segnatura di un prodotto scalare (o hermitiano). Infatti, detta $A = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$, $D = P^{\top} A P$, e dunque $D \cong A$. Allora, essendo D diagonale, l'indice di positività è esattamente il numero di valori positivi sulla diagonale, ossia il numero di autovalori positivi di A . Analogamente l'indice di negatività è il numero di autovalori negativi, e quello di nullità è la molteplicità algebrica di 0 come autovalore (ossia esattamente la dimensione di $V_{\varphi}^{\perp} = \text{Ker } a_{\varphi}$).

Teorema 3.5 (di triangolazione con base ortonormale). Sia $f \in \text{End}(V)$, dove (V, φ) è uno spazio euclideo su \mathbb{K} . Allora, se p_f è completamente riducibile in \mathbb{K} , esiste una base ortonormale \mathcal{B} tale per cui $M_{\mathcal{B}}(f)$ è triangolare superiore (ossia esiste una base ortonormale a bandiera per f).

Dimostrazione. Per il teorema di triangolazione, esiste una base \mathcal{B} a bandiera per f . Allora, applicando l'algoritmo di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt, si può ottenere da \mathcal{B} una nuova base \mathcal{B}' ortonormale e che mantenga le stesse bandiere. Allora, se $\mathcal{B}' = \{v_1, \dots, v_n\}$ è ordinata, dacché $\text{Span}(v_1, \dots, v_i)$ è f -invariante, $f(v_i) \in \text{Span}(v_1, \dots, v_i)$, e quindi $M_{\mathcal{B}'}(f)$ è triangolare superiore, da cui la tesi. \square

Corollario 3.4. Sia $A \in M(n, \mathbb{R})$ (o $M(n, \mathbb{C})$) tale per cui p_A è completamente riducibile. Allora $\exists P \in O_n$ (o U_n) tale per cui $P^{-1} A P = P^{\top} A P$ (o $P^{-1} A P = P^* A P$) è triangolare superiore.

Dimostrazione. Si consideri l'operatore f_A indotto da A in \mathbb{R}^n (o \mathbb{C}^n). Sia \mathcal{B} la base canonica di \mathbb{R}^n (o di \mathbb{C}^n). Allora, per il teorema di triangolazione con base ortonormale, esiste una base ortonormale $\mathcal{B}' = \{v_1, \dots, v_n\}$ di \mathbb{R}^n (o di \mathbb{C}^n) tale per cui $T = M_{\mathcal{B}'}(f_A)$ è triangolare superiore. Si osserva inoltre che $M_{\mathcal{B}}(f_A) = A$ e che $P = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(f_A) = \left(\underline{v}_1 \mid \cdots \mid \underline{v}_n \right)$ è ortogonale (o unitaria), dacché le sue colonne formano una base ortonormale. Allora, dalla formula del cambiamento di base per la applicazioni lineari, si ricava che:

$$A = P T P^{-1} \implies T = P^{-1} T P,$$

da cui, osservando che $P^{-1} = P^{\top}$ (o $P^{-1} = P^*$), si ricava la tesi. \square

Definizione (operatore normale). Sia (V, φ) uno spazio euclideo reale. Allora $f \in \text{End}(V)$ si dice **normale** se commuta con il suo trasposto (i.e. se $ff^\top = f^\top f$). Analogamente, se (V, φ) è uno spazio euclideo complesso, allora f si dice normale se commuta con il suo aggiunto (i.e. se $ff^* = f^*f$).

Definizione (matrice normale). Una matrice $A \in M(n, \mathbb{R})$ (o $M(n, \mathbb{C})$) si dice **normale** se $AA^\top = A^\top A$ (o $AA^* = A^*A$).

Osservazione.

- ▶ Se $A \in M(n, \mathbb{R})$ e A è simmetrica ($A = A^\top$), antisimmetrica ($A = -A^\top$) o ortogonale ($AA^\top = A^\top A = I_n$), sicuramente A è normale.
- ▶ Se $A \in M(n, \mathbb{C})$ e A è hermitiana ($A = A^*$), antihermitiana ($A = -A^*$) o unitaria ($AA^* = A^*A = I_n$), sicuramente A è normale.
- ▶ f è normale $\iff M_{\mathcal{B}}(f)$ è normale, con \mathcal{B} ortonormale di V .
- ▶ A è normale $\iff f_A$ è normale, considerando che la base canonica di \mathbb{C}^n è già ortonormale rispetto al prodotto hermitiano standard.
- ▶ Se V è euclideo reale, f è normale $\iff f_{\mathbb{C}}$ è normale. Infatti, se f è normale, f e f^\top commutano. Allora anche $f_{\mathbb{C}}$ e $(f^\top)_{\mathbb{C}} = (f_{\mathbb{C}})^*$ commutano, e quindi $f_{\mathbb{C}}$ è normale. Ripercorrendo i passaggi al contrario, si osserva infine che vale anche il viceversa.

Lemma 3.1. Sia $A \in M(n, \mathbb{C})$ triangolare superiore e normale (i.e. $AA^* = A^*A$). Allora A è diagonale.

Dimostrazione. Se A è normale, allora $(A^*)_i A^i = \bar{A}^i A^i$ deve essere uguale a $A_i (A^*)_i = A_i \bar{A}_i \forall 1 \leq i \leq n$. Si dimostra per induzione su i da 1 a n che tutti gli elementi, eccetto per quelli diagonali, delle righe A_1, \dots, A_i sono nulli.

(*passo base*) Si osserva che valgono le seguenti identità:

$$\begin{aligned} \bar{A}^1 A^1 &= |a_{11}|^2, \\ A_1 \bar{A}_1 &= |a_{11}|^2 + |a_{12}|^2 + \dots + |a_{1n}|^2. \end{aligned}$$

Dovendo vale l'uguaglianza, si ricava che $|a_{12}|^2 \dots + |a_{1n}|^2 = 0$, e quindi che $|a_{1i}|^2 = 0 \implies a_{1i} = 0 \quad \forall 2 \leq i \leq n$, dimostrando il passo base⁹.

(*passo induttivo*) Analogamente a prima, si considerano le seguenti identità:

$$\begin{aligned} \bar{A}^i A^i &= |a_{1i}|^2 + \dots + |a_{ii}|^2 = |a_{ii}|^2, \\ A_i \bar{A}_i &= |a_{ii}|^2 + |a_{i(i+1)}|^2 + \dots + |a_{in}|^2, \end{aligned}$$

dove si è usato che, per il passo induttivo, tutti gli elementi, eccetto per quelli diagonali, delle righe A_1, \dots, A_{i-1} sono nulli. Allora, analogamente a prima, si ricava che $a_{ij} = 0 \quad \forall i < j \leq n$, dimostrando il passo induttivo, e quindi la tesi. \square

⁹Gli altri elementi sono infatti già nulli per ipotesi, essendo A triangolare superiore

Osservazione.

► Chiaramente vale anche il viceversa del precedente lemma: se infatti $A \in M(n, \mathbb{C})$ è diagonale, A è anche normale, dal momento che commuta con A^* .

► Reiterando la stessa dimostrazione del precedente lemma per $A \in M(n, \mathbb{R})$ triangolare superiore e normale reale (i.e. $AA^\top = A^\top A$) si può ottenere una tesi analoga.

Teorema 3.6. Sia (V, φ) uno spazio euclideo complesso. Allora f è un operatore normale \iff esiste una base ortonormale \mathcal{B} di autovettori per f .

Dimostrazione. Si dimostrano le due implicazioni separatamente.

(\implies) Poiché \mathbb{C} è algebricamente chiuso, p_f è sicuramente riducibile. Pertanto, per il teorema di triangolazione con base ortonormale, esiste una base ortonormale \mathcal{B} a bandiera per f . In particolare, $M_{\mathcal{B}}(f)$ è sia normale che triangolare superiore. Allora, per il Lemma 1, $M_{\mathcal{B}}(f)$ è diagonale, e dunque \mathcal{B} è anche una base di autovettori per f .

(\impliedby) Se esiste una base ortonormale \mathcal{B} di autovettori per f , $M_{\mathcal{B}}(f)$ è diagonale, e dunque anche normale. Allora, poiché \mathcal{B} è ortonormale, anche f è normale. \square

Corollario 3.5. Sia $A \in M(n, \mathbb{C})$. Allora A è normale $\iff \exists U \in U_n$ tale che $U^{-1}AU = U^*AU$ è diagonale.

Dimostrazione. Si dimostrano le due implicazioni separatamente.

(\implies) Sia \mathcal{B} la base canonica di \mathbb{C}^n . Si consideri l'applicazione lineare f_A indotta da A su \mathbb{C}^n . Se A è normale, allora anche f_A lo è. Pertanto, per il precedente teorema, esiste una base ortonormale $\mathcal{B}' = \{v_1, \dots, v_n\}$ di autovettori per f_A . In particolare, $U = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{Id}) = \left(\begin{array}{c|ccc} v_1 & & & \\ \hline & \dots & & \\ & & v_n & \end{array} \right)$ è unitaria ($U \in U_n$), dacché le colonne di U sono ortonormali. Si osserva inoltre che $M_{\mathcal{B}}(f_A) = A$ e che $D = M_{\mathcal{B}'}(f_A)$ è diagonale. Allora, per la formula del cambiamento di base per le applicazioni lineari, si conclude che:

$$A = UDU^{-1} \implies D = U^{-1}AU = U^*AU,$$

ossia che U^*AU è diagonale.

(\impliedby) Sia $D = U^*AU$. Dacché D è diagonale, D è anche normale. Pertanto $DD^* = D^*D$. Sostituendo, si ottiene che $U^*AUU^*A^*U = U^*A^*UU^*AU$. Ricordando che $U^*U = I_n$ e che $U \in U_n$ è sempre invertibile, si conclude che $AA^* = A^*A$, ossia che A è normale a sua volta, da cui la tesi. \square

Osservazione.

► Si può osservare mediante l'applicazione dell'ultimo corollario che, se A è hermitiana (ed è dunque anche normale), $\exists U \in U_n \mid U^*AU = D$, dove $D \in M(n, \mathbb{R})$, ossia tale corollario implica il teorema spettrale in forma complessa. Infatti $\overline{D} = D^* = U^*A^*U = U^*AU = D \implies D \in M(n, \mathbb{R})$.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

► Se $A \in M(n, \mathbb{R})$ è una matrice normale reale (i.e. $AA^\top = A^\top A$) con p_A completamente riducibile in \mathbb{R} , allora è possibile reiterare la dimostrazione del precedente teorema per concludere che $\exists O \in O_n \mid O^\top A O = D$ con $D \in M(n, \mathbb{R})$, ossia che $A = O D O^\top$. Tuttavia questo implica che $A^\top = (O D O^\top) = O D^\top O^\top = O D O^\top = A$, ossia che A è simmetrica. In particolare, per il teorema spettrale reale, vale anche il viceversa. Pertanto, se $A \in M(n, \mathbb{R})$, A è una matrice normale reale con p_A completamente riducibile in $\mathbb{R} \iff A = A^\top$.

Esercizio 3. Sia V uno spazio dotato del prodotto φ . Sia $W \subseteq V$ un sottospazio di V . Sia $\mathcal{B}_W = \{\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_k\}$ una base di W e sia $\mathcal{B} = \{\underline{w}_1, \dots, \underline{w}_k, \underline{v}_{k+1}, \dots, \underline{v}_n\}$ una base di V . Sia $A = M_{\mathcal{B}}(\varphi)$. Si dimostrino allora i seguenti risultati.

- (i) $W^\perp = \{\underline{v} \in V \mid \varphi(\underline{v}, \underline{w}_i) = 0\}$,
- (ii) $W^\perp = \{\underline{v} \in V \mid A_{1, \dots, k}[\underline{v}]_{\mathcal{B}} = 0\} = [\cdot]_{\mathcal{B}}^{-1}(\text{Ker } A_{1, \dots, k})$,
- (iii) $\dim W^\perp = \dim V - \text{rg}(A_{1, \dots, k})$,
- (iv) Se φ è non degenere, $\dim W + \dim W^\perp = \dim V$.

Soluzione. Chiaramente vale l'inclusione $W^\perp \subseteq \{\underline{v} \in V \mid \varphi(\underline{v}, \underline{w}_i) = 0\}$. Sia allora $\underline{v} \in V \mid \varphi(\underline{v}, \underline{w}_i) = 0 \forall 1 \leq i \leq k$ e sia $\underline{w} \in W$. Allora esistono $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ tali che $\underline{w} = \alpha_1 \underline{w}_1 + \dots + \alpha_k \underline{w}_k$. Pertanto si conclude che $\varphi(\underline{v}, \alpha_1 \underline{w}_1 + \dots + \alpha_k \underline{w}_k) = \alpha_1 \varphi(\underline{v}, \underline{w}_1) + \dots + \alpha_k \varphi(\underline{v}, \underline{w}_k) = 0 \implies \underline{v} \in W^\perp$. Pertanto $W^\perp = \{\underline{v} \in V \mid \varphi(\underline{v}, \underline{w}_i) = 0\}$, dimostrando (i).

Si osserva che $\varphi(\underline{v}, \underline{w}_i) = 0 \iff \varphi(\underline{w}_i, \underline{v}) = 0$. Se φ è scalare, allora $\varphi(\underline{w}_i, \underline{v}) = 0 \stackrel{\text{def}}{\iff} [\underline{w}_i]_{\mathcal{B}}^\top A[\underline{v}]_{\mathcal{B}} = (e_i)^\top A[\underline{v}]_{\mathcal{B}} = A_i[\underline{v}]_{\mathcal{B}} = 0$. Pertanto $\underline{v} \in W^\perp \iff A_i[\underline{v}]_{\mathcal{B}} = 0 \forall 1 \leq i \leq k$, ossia se $A_{1, \dots, k}[\underline{v}]_{\mathcal{B}} = 0$ e $[\underline{v}]_{\mathcal{B}} \in \text{Ker } A_{1, \dots, k}$, dimostrando (ii). Analogamente si ottiene la tesi se φ è hermitiano. Applicando la formula delle dimensioni, si ricava dunque che $\dim W^\perp = \dim \text{Ker } A_{1, \dots, k} = \dim V - \text{rg } A_{1, \dots, k}$, dimostrando (iii).

Se φ è non degenere, A è invertibile, dacché $\dim V^\perp = \dim \text{Ker } A = 0$. Allora ogni minore di taglia k di A ha determinante diverso da zero. Dacché ogni minore di taglia k di $A_{1, \dots, k}$ è anche un minore di taglia k di A , si ricava che anche ogni minore di taglia k di $A_{1, \dots, k}$ ha determinante diverso da zero, e quindi che $\text{rg}(A_{1, \dots, k}) \geq k$. Dacché deve anche valere $\text{rg}(A_{1, \dots, k}) \leq \min\{k, n\} = k$, si conclude che $\text{rg}(A_{1, \dots, k})$ vale esattamente $k = \dim W$. Allora, dal punto (iii), vale che $\dim W^\perp + \dim W = \dim W^\perp + \text{rg}(A_{1, \dots, k}) = \dim V$, dimostrando il punto (iv). \square

Esercizio 4. Sia V uno spazio dotato del prodotto φ . Sia $U \subseteq V$ un sottospazio di V . Si dimostrino allora i seguenti due risultati.

- (i) Il prodotto φ induce un prodotto $\tilde{\varphi} : V/U \times V/U \rightarrow \mathbb{K}$ tale che $\tilde{\varphi}(\underline{v} + U, \underline{v}' + U) = \varphi(\underline{v}, \underline{v}')$ se e soltanto se $U \subseteq V^\perp$, ossia se e solo se $U \perp V$.
- (ii) Se $U = V^\perp$, allora il prodotto $\tilde{\varphi}$ è non degenere.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

- (iii) Sia $\pi : V \rightarrow V/V^\perp$ l'applicazione lineare di proiezione al quoziente. Allora $U^\perp = \{\underline{v} \in V \mid \tilde{\varphi}(\pi(\underline{v}), \pi(\underline{u})) = 0 \ \forall \underline{u} \in U\} = \pi^{-1}(\pi(U)^\perp)$.
- (iv) Vale la formula delle dimensioni per il prodotto φ : $\dim U + \dim U^\perp = \dim V + \dim(U \cap V^\perp)$.

Soluzione. Sia $\underline{w} = \underline{v} + \underline{u}_1 \in \underline{v} + U$, con $\underline{u}_1 \in U$. Se $\tilde{\varphi}$ è ben definito, allora deve valere l'uguaglianza $\varphi(\underline{v}, \underline{v}') = \varphi(\underline{w}, \underline{v}') = \varphi(\underline{v} + \underline{u}_1, \underline{v}') = \varphi(\underline{v}, \underline{v}') + \varphi(\underline{u}_1, \underline{v}')$, ossia $\varphi(\underline{u}_1, \underline{v}') = 0 \ \forall \underline{v}' \in V \implies \underline{u}_1 \in V^\perp \implies U \subseteq V^\perp$. Viceversa, se $U \subseteq V^\perp$, sia $\underline{w}' = \underline{v}' + \underline{u}_2 \in \underline{v}' + U$, con $\underline{u}_2 \in U$. Allora vale la seguente identità:

$$\varphi(\underline{w}, \underline{w}') = \varphi(\underline{v} + \underline{u}_1, \underline{v}' + \underline{u}_2) = \varphi(\underline{v}, \underline{v}') + \underbrace{\varphi(\underline{v}, \underline{u}_2) + \varphi(\underline{u}_1, \underline{v}') + \varphi(\underline{u}_1, \underline{u}_2)}_{=0}.$$

Pertanto $\tilde{\varphi}$ è ben definito, dimostrando (i).

Sia ora $U = V/V^\perp$. Sia $\underline{v} + U \in (V/U)^\perp = \text{Rad}(\tilde{\varphi})$. Allora, $\forall \underline{v}' + U \in V/U$, $\tilde{\varphi}(\underline{v} + U, \underline{v}' + U) = \varphi(\underline{v}, \underline{v}') = 0$, ossia $\underline{v} \in V^\perp = U$. Pertanto $\underline{v} + U = U \implies \text{Rad}(\tilde{\varphi}) = \{V^\perp\}$, e quindi $\tilde{\varphi}$ è non degenere, dimostrando (ii).

Si dimostra adesso l'uguaglianza $U^\perp = \pi^{-1}(\pi(U)^\perp)$. Sia $\underline{v} \in U^\perp$. Allora $\tilde{\varphi}(\pi(\underline{v}), \pi(\underline{u})) = \tilde{\varphi}(\underline{v} + V^\perp, \underline{u} + V^\perp) = \varphi(\underline{v}, \underline{u}) = 0 \ \forall \underline{u} \in U$, da cui si ricava che vale l'inclusione $U^\perp \subseteq \pi^{-1}(\pi(U)^\perp)$. Sia ora $\underline{v} \in \pi^{-1}(\pi(U)^\perp)$, e sia $\underline{u} \in U$. Allora $\varphi(\underline{v}, \underline{u}) = \tilde{\varphi}(\underline{v} + V^\perp, \underline{u} + V^\perp) = \tilde{\varphi}(\pi(\underline{v}), \pi(\underline{u})) = 0$, da cui vale la doppia inclusione, e dunque l'uguaglianza desiderata, dimostrando (iii).

Dall'uguaglianza del punto (iii), l'applicazione della formula delle dimensioni e l'identità ottenuta dal punto (iv) dell'*Esercizio 2* rispetto al prodotto $\tilde{\varphi}$ non degenere, si ricavano le seguenti identità:

$$\begin{cases} \dim \pi(U) = \dim U - \dim(U \cap \text{Ker } \pi) = \dim U - \dim(U \cap V^\perp), \\ \dim \pi(U)^\perp = \dim V/V^\perp - \dim \pi(U) = \dim V - \dim V^\perp - \dim \pi(U), \\ \dim U^\perp = \dim \pi(U)^\perp + \dim \text{Ker } \pi = \dim \pi(U)^\perp + \dim V^\perp, \end{cases}$$

dalle quali si ricava la seguente identità:

$$\dim U^\perp = \dim V - \dim V^\perp - (\dim U - \dim(U \cap V^\perp)) + \dim V^\perp,$$

da cui si ricava che $\dim U + \dim U^\perp = \dim V + \dim(U \cap V^\perp)$, dimostrando (iv). \square

Esercizio 5. Sia V uno spazio vettoriale dotato del prodotto φ . Si dimostri allora che $(W^\perp)^\perp = W + V^\perp$.

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

Soluzione. Sia $\underline{v} = \underline{w}' + \underline{v}' \in W + V^\perp$, con $\underline{w}' \in W$ e $\underline{v}' \in V^\perp$. Sia inoltre $\underline{w} \in W^\perp$. Allora $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = \varphi(\underline{w}' + \underline{v}', \underline{w}) = \varphi(\underline{w}', \underline{w}) + \varphi(\underline{v}', \underline{w}) = 0$, dove si è usato che $\underline{w}' \perp \underline{w}$ dacché $\underline{w} \in W^\perp$ e $\underline{w}' \in W$ e che $\underline{v}' \in V^\perp$. Allora vale l'inclusione $W + V^\perp \subseteq (W^\perp)^\perp$.

Applicando le rispettive formule delle dimensioni a W^\perp , $(W^\perp)^\perp$ e $W + V^\perp$ si ottengono le seguenti identità:

$$\begin{cases} \dim W^\perp = \dim V + \dim(W \cap V^\perp) - \dim W, \\ \dim(W^\perp)^\perp = \dim V + \dim(W^\perp \cap V^\perp) - \dim W^\perp, \\ \dim(W + V^\perp) = \dim W + \dim V^\perp - \dim(W \cap V^\perp), \end{cases}$$

da cui si ricava che:

$$\dim(W^\perp)^\perp = \dim W + \dim V^\perp - \dim(W \cap V^\perp) = \dim(W + V^\perp).$$

Dal momento che vale un'inclusione e l'uguaglianza dimensionale, si conclude che $(W^\perp)^\perp = W + V^\perp$, da cui la tesi. \square

Esercizio 6. Sia $A \in M(n, \mathbb{C})$ anti-hermitiana (i.e. $A = -A^*$). Si dimostri allora che A è normale e che ammette solo autovalori immaginari.

Soluzione. Si mostra facilmente che A è normale. Infatti $AA^* = A(-A) = -A^2 = (-A)A = A^*A$. Sia allora $\lambda \in \mathbb{C}$ un autovalore di A e sia $\underline{v} \neq \underline{0}$, $\underline{v} \in V_\lambda$. Si consideri il prodotto hermitiano standard φ su \mathbb{C}^n . Allora vale la seguente identità:

$$\begin{aligned} \lambda \varphi(\underline{v}, \underline{v}) &= \varphi(\underline{v}, \lambda \underline{v}) = \varphi(\underline{v}, A\underline{v}) = \varphi(A^* \underline{v}, \underline{v}) = \\ &= \varphi(-A\underline{v}, \underline{v}) = \varphi(-\lambda \underline{v}, \underline{v}) = -\bar{\lambda} \varphi(\underline{v}, \underline{v}). \end{aligned}$$

Dacché φ è definito positivo, $\varphi(\underline{v}, \underline{v}) \neq 0 \implies \lambda = -\bar{\lambda}$. Allora $\Re(\lambda) = \frac{\lambda + \bar{\lambda}}{2} = 0$, e quindi λ è immaginario, da cui la tesi. \square

Esercizio 7. Sia V uno spazio vettoriale dotato del prodotto φ . Siano $U, W \subseteq V$ due sottospazi di V . Si dimostrino allora le due seguenti identità.

(i) $(U + W)^\perp = U^\perp \cap W^\perp$,

(ii) $(U \cap W)^\perp \supseteq U^\perp + W^\perp$, dove vale l'uguaglianza insiemistica se φ è non degenera.

Soluzione. Sia $\underline{v} \in (U + W)^\perp$ e siano $\underline{u} \in U \subseteq U + W$, $\underline{w} \in W \subseteq U + W$. Allora $\varphi(\underline{v}, \underline{u}) = 0 \implies \underline{v} \in U^\perp$ e $\varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0 \implies \underline{v} \in W^\perp$, da cui si conclude che $(U + W)^\perp \subseteq U^\perp \cap W^\perp$. Sia adesso $\underline{v} \in U^\perp \cap W^\perp$ e $\underline{v}' = \underline{u} + \underline{w} \in U + W$ con $\underline{u} \in U$ e $\underline{w} \in W$. Allora $\varphi(\underline{v}, \underline{v}') = \varphi(\underline{v}, \underline{u}) + \varphi(\underline{v}, \underline{w}) = 0 \implies \underline{v} \in (U + W)^\perp$, da cui si deduca che vale la doppia inclusione, e quindi che $(U + W)^\perp = U^\perp \cap W^\perp$, dimostrando (i).

3 Spazi euclidei e teorema spettrale (non indicizzato)

Sia ora $\underline{v}' = \underline{u}' + \underline{w}' \in U^\perp + W^\perp$ con $\underline{u}' \in U^\perp$ e $\underline{w}' \in W^\perp$. Sia $\underline{v} \in U \cap W$. Allora $\varphi(\underline{v}, \underline{v}') = \varphi(\underline{v}, \underline{u}') + \varphi(\underline{v}, \underline{w}') = 0 \implies \underline{v}' \in (U \cap W)^\perp$, da cui si deduce che $(U \cap W)^\perp \supseteq U^\perp + W^\perp$. Se φ è non degenere, $\dim(U^\perp + W^\perp) = \dim U^\perp + \dim W^\perp - \dim(U^\perp \cap W^\perp) = 2 \dim V - \dim U - \dim W - \dim(U + W)^\perp = \dim V - \dim U - \dim W + \dim(U + W) = \dim V - \dim(U + W) = \dim(U + W)^\perp$. Valendo pertanto l'uguaglianza dimensionale, si conclude che in questo caso $(U \cap W)^\perp = U^\perp + W^\perp$, dimostrando (ii). \square