



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

UNIVERSITÀ "SAPIENZA" DI ROMA
FACOLTÀ DI INFORMATICA

Algebra

Appunti integrati con il libro "Geometria analitica con elementi di Algebra lineare", M. Abate, C. De Fabritiis

Author
Simone Bianco

27 dicembre 2022

Indice

0	Introduzione	1
1	Strutture algebriche principali	2
1.1	Richiami di insiemistica	2
1.2	Operazioni binarie, Assiomi e Proprietà	4
1.3	Semigrupperi, Monoidi e Gruppi	6
1.4	Anelli e Campi	7
1.5	Sottogruppi ed Ideali	8
2	Numeri Complessi	11
2.1	Il campo dei numeri complessi	12
2.2	Forma polare dei numeri complessi	13
2.3	Teorema fondamentale dell'algebra	16
3	Relazioni e Induzione	18
3.1	Classi di equivalenza	19
3.2	Relazione di Divisore	21
3.3	Relazione di Congruenza	22
3.4	Teorema della divisione con resto euclidea	23
3.5	Relazione di Coniugio	24
3.6	Induzione matematica	25
4	Elementi di Teoria degli Anelli	29
4.1	Insieme quoziente	29
4.1.1	Classi laterali sinistre	29
4.1.2	Teorema di Lagrange	32
4.2	L'anello commutativo \mathbb{Z}_n	32
4.3	Invertibili e Divisori dello zero	34
4.3.1	Irriducibili e Primi	36
4.4	Massimo comun divisore	38
4.4.1	Algoritmo di Euclide	41
4.4.2	Approfondimento sull'Identità di Bezout	44
4.4.3	Criteri di divisibilità	45
4.5	Minimo comune multiplo	46
4.5.1	Teorema fondamentale dell'aritmetica	47
4.6	Teorema cinese dei resti	48
4.7	Piccolo teorema di Fermat	55
4.8	Ordine di un elemento di un gruppo	57

5	Gruppo Simmetrico	64
5.1	Ordine di una permutazione	66
5.2	Segno delle permutazioni	68
6	Morfismi	75
6.1	Isomorfismi, Endomorfismi ed Automorfismi	76
6.2	Nucleo ed Immagine di un morfismo	78
6.3	Teorema fondamentale di isomorfismo	80
6.4	Sottogruppi normali	82
6.5	Gruppi diedrali	87
6.6	Gruppo di Klein e Teorema di Cauchy	91
7	Polinomi	95
7.1	Divisione con resto di polinomi	97
7.1.1	Regola di Ruffini	99
7.2	Proprietà dell'anello polinomiale	100
7.3	Polinomi in \mathbb{Z}_p	107
8	Spazi vettoriali	110
8.1	Span e Base di uno spazio	112
8.2	Trasformazioni lineari	117
8.2.1	Teorema del Rango e Formula di Grassman	120
8.3	Spazi affini, Sottospazi affini e Giacitura	124
8.4	Prodotto scalare	125
9	Matrici	127
9.1	Prodotto tra matrici	129
9.2	Rango di una matrice	130
9.2.1	Riduzione a scala di una matrice	132
9.3	Teorema di Rouché-Capelli	135
9.3.1	Equazioni parametriche	138
9.4	Matrice di una trasformazione lineare	140
9.5	Determinante di una matrice	143
9.5.1	Formula di Leibniz e Regola di Sarrus	144
9.5.2	Determinante tramite riduzione a scala	146
9.5.3	Sviluppo di Laplace	148
9.5.4	Regola di Cramer	150
9.6	Inversa di una matrice	151
9.7	Teorema degli orlati	156
9.8	Matrici simili	162
9.8.1	Invarianti per similitudine	163
9.8.2	Diagonalizzazione di una matrice	168
9.9	Matrici ortogonali	173

Capitolo 0

Introduzione

Il seguente corso mira all'apprendimento dei principali elementi di Algebra Elementare, Algebra Lineare e Teoria dei Gruppi, incentrandosi principalmente su:

- **Insiemi**, partizioni, applicazioni, **relazioni** d'equivalenza e d'ordine, permutazioni. I numeri naturali e il **principio di induzione**. Il teorema binomiale.
- **Strutture algebriche**: Gruppi, anelli e campi, reticoli, sottostrutture, omomorfismi. Anelli di polinomi. L'algoritmo di Euclide. Classi resto modulo un intero. Congruenze ed equazioni in \mathbb{Z}/n . Il teorema di Eulero-Fermat.
- **Sistemi di equazioni lineari**: algoritmo di Gauss, determinante di una matrice quadrata. Matrice inversa. Rango di una matrice: Il teorema di Cramer ed il teorema di Rouché-Capelli. Risoluzione di sistemi lineari omogenei.
- **Spazi vettoriali**: dipendenza e indipendenza lineare, basi. Matrici. Applicazioni lineari e loro rappresentazione: cambiamenti di base, diagonalizzazione di un operatore lineare. Polinomio caratteristico e relativa invarianza.
- **Elementi di teoria dei gruppi**: Gruppi ciclici, periodo di un elemento di un gruppo. Classificazione dei gruppi ciclici. Classi laterali modulo un sottogruppo. Il teorema di Lagrange e le sue conseguenze, sottogruppi normali. Il teorema fondamentale di omomorfismo tra gruppi.

Prima di approcciarsi al seguente corso, è consigliato avere una conoscenza sufficiente dei concetti espressi nel corso di *Metodi Matematici per l'Informatica*.

Capitolo 1

Strutture algebriche principali

1.1 Richiami di insiemistica

Definiamo **insieme** una collezione di elementi su cui vengono svolte delle **operazioni algebriche**.

$$S : \{1, 2, 3, 4, \dots\}$$

In questo corso tratteremo molto le proprietà e le operazioni applicabili sulle varie **strutture algebriche** rappresentate tramite insiemi, pertanto effettuiamo un breve ripasso di **teoria degli insiemi**:

- Dati due insiemi A, B , definiamo l'**insieme unione** $A \cup B$ come l'insieme dove

$$A \cup B : \{x \in A \vee x \in B\}$$

- Definiamo invece come **insieme intersezione** $A \cap B$ l'insieme dove

$$A \cap B : \{x \in A \wedge x \in B\}$$

- Considerato un insieme X , affermiamo che l'insieme A è **sottoinsieme** dell'insieme X (denotato come $A \subseteq X$) se si verifica che

$$A \subseteq X \iff x \in A \implies x \in X$$

- Considerato un insieme X e un insieme A tale che $A \subseteq X$, denotiamo l'**insieme complementare** di A su X come

$$X - A = \{x \in X \mid x \notin A\}$$

- La **legge di De Morgan** afferma che

$$X - (A \cup B) = (X - A) \cap (X - B)$$

$$X - (A \cap B) = (X - A) \cup (X - B)$$

- Dato un insieme di partenza detto **dominio** ed un insieme di arrivo detto **codominio**, definiamo come **funzione** la relazione che associa ogni elemento del dominio ad un elemento del codominio

$$f : X \rightarrow Y : x \mapsto y$$

- Definiamo come **immagine della funzione** l'insieme di tutti gli elementi del codominio raggiungibili da un elemento del dominio

$$Im(f) = \{y \in Y \mid f(x) = y, \exists x \in X\}$$

- Una funzione viene detta **iniettiva** se ogni elemento del dominio è associato ad un elemento diverso del codominio

$$\text{Iniettività} : \forall x_1, x_2 \in X \mid x_1 \neq x_2 \implies f(x_1) \neq f(x_2)$$

- Una funzione viene detta **suriettiva** se ogni elemento del codominio è raggiungibile da almeno un elemento del dominio

$$\text{Suriettività} : \forall y \in Y, \exists x \in X \mid f(x) = y$$

In alternativa, potremmo affermare che una funzione è suriettiva se la sua immagine coincide con il suo codominio

$$\text{Suriettività} : Im(f) = Y$$

- Una funzione viene detta **biettiva** (o biunivoca) se è sia iniettiva sia suriettiva. Se esiste una funzione biettiva tra due insiemi X ed Y , allora tali insiemi possiedono la **stessa cardinalità**

$$\exists f : X \rightarrow Y \mid f \text{ è biettiva} \implies |X| = |Y|$$

- Definiamo come **prodotto cartesiano** di due insiemi X e Y l'insieme contenente tutte le coppie (x, y) dove $x \in X$ e $y \in Y$

$$X \times Y : \{(x, y) \mid x \in X, y \in Y\}$$

- Date due funzioni f, g , la loro **funzione composta** è una funzione che associa un elemento del dominio di f ad un elemento del codominio di g

$$f : X \rightarrow Y : x \mapsto f(x)$$

$$g : Y \rightarrow Z : x \mapsto g(x)$$

$$g \circ f : X \rightarrow Z : x \mapsto g(f(x)) : x \mapsto (g \circ f)(x)$$

- Definiamo come **insieme dei numeri naturali** l'insieme

$$\mathbb{N} : \{0, 1, 2, 3, \dots\}$$

- Definiamo come **insieme dei numeri interi** l'insieme

$$\mathbb{Z} : \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$$

- Definiamo come **insieme dei numeri razionali** l'insieme

$$\mathbb{Q} : \left\{ \frac{m}{n} \mid m, n \in \mathbb{Z}, n \neq 0 \right\}$$

- Definiamo come **insieme dei numeri irrazionali** l'insieme

$$\mathbb{I} : \left\{ x \mid \nexists m, n \in \mathbb{Z} : x = \frac{m}{n} \right\}$$

- Definiamo come **insieme dei numeri reali** l'insieme

$$\mathbb{R} = \mathbb{Q} \cup \mathbb{I}$$

1.2 Operazioni binarie, Assiomi e Proprietà

Una particolare categoria di funzioni che studieremo durante il corso corrisponde alle **operazioni binarie**:

Definition 1. Operazione binaria

Dato un insieme S , definiamo **operazione binaria** una funzione che manda ogni coppia di elementi appartenenti ad S in S stesso. Tale proprietà viene anche detta **assioma di chiusura**.

$$m : S \times S \rightarrow S : (x, y) \mapsto m(x, y)$$

Ad esempio, sull'insieme \mathbb{R} possiamo considerare l'**operazione binaria additiva**, indicata come

$$+ : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : (x, y) \mapsto x + y$$

e l'**operazione binaria moltiplicativa**, indicata come

$$\cdot : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : (x, y) \mapsto xy$$

Inoltre, anche la **composizione tra funzioni** corrisponde ad un'operazione binaria:

$$\circ : X \times X \rightarrow X : (g, f) \mapsto g \circ f$$

Definition 2. Associatività (Assioma 1)

Data un'operazione binaria $m : S \times S \rightarrow S$ e tre elementi $x, y, z \in S$, l'**ordine di applicazione** di tale operazione binaria non influenza il risultato

$$m(m(x, y), z) = m(x, m(y, z)) \quad \forall x, y, z \in S$$

Esempi:

- Operazione additiva: $(x + y) + z = x + (y + z) = x + y + z \quad \forall x, y, z \in S$
- Operazione prodotto: $(xy)z = x(yz) = xyz \quad \forall x, y, z \in S$

Definition 3. Elemento neutro (Assioma 2)

Data un'operazione binaria $m : S \times S \rightarrow S$, esiste un **elemento neutro** e tale che

$$m(x, e) = m(e, x) = x \quad \forall x \in S$$

Esempi:

- Operazione additiva: $x + 0 = x \quad \forall x \in S$
- Operazione prodotto: $x \cdot 1 = x \quad \forall x \in S$

Definition 4. Elemento inverso (Assioma 3)

Data un'operazione binaria $m : S \times S \rightarrow S$, per ogni elemento $x \in S$, esiste un **elemento inverso** x^{-1} tale che

$$m(x, x^{-1}) = m(x^{-1}, x) = e$$

Attenzione: con x^{-1} indichiamo l'inverso di x rispetto all'operazione, non necessariamente l'inverso moltiplicativo "classico" (ossia $\frac{1}{x}$)

Esempi:

- Operazione additiva: $x + (-x) = 0 \quad \forall x \in S$
- Operazione prodotto: $x \cdot \frac{1}{x} = 1 \quad \forall x \in S$

Definition 5. Commutatività (Assioma 4)

Data un'operazione binaria $m : S \times S \rightarrow S$, l'ordine elementi non influenza il risultato

$$m(x, y) = m(y, x) \quad \forall x, y \in S$$

Esempi:

- Operazione additiva: $x + y = y + x \quad \forall x, y \in S$
- Operazione prodotto: $xy = yx \quad \forall x, y \in S$

Observation 1

1. Può esistere **un solo elemento neutro**:

$$e_1 = m(e_1, e_2) = m(e_2, e_1) = e_2 \implies e_1 = e_2$$

2. Può esistere **un solo elemento inverso**:

$$m(x, x_1^{-1}) = e = m(x, x_2^{-1}) \implies m(x, x_1^{-1}) = m(x, x_2^{-1}) \implies x_1^{-1} = x_2^{-1}$$

1.3 Semigrupperi, Monoidi e Gruppi

Una volta definiti i quattro assiomi principali delle operazioni binarie, possiamo definire le seguenti quattro **strutture algebriche**:

Definition 6. Strutture algebriche semplici

Data la coppia (S, m) dove S è un **insieme** e m l'**operazione binaria** applicata su di esso, diciamo che tale coppia è:

- Un **semigruppero** se vale l'assioma di associatività (assioma 1)
- Un **monoide** se valgono gli assiomi di d'associatività e di elemento neutro (assiomi 1 e 2)
- Un **gruppo** se valgono gli assiomi di associatività, elemento neutro e elemento inverso (assiomi 1, 2 e 3)
- Un **gruppo abeliano** (o commutativo) se valgono gli assiomi di associatività, elemento neutro, elemento inverso e commutatività (assiomi 1, 2, 3 e 4)

Esempi:

- $(\mathbb{N} - \{0\}, +)$ è un **semigruppero** (assioma 1)
- $(\mathbb{N}, +)$ è un **monoide** commutativo (assiomi 1, 2 e 4)
- (\mathbb{Q}, \div) è un **gruppo** (assiomi 1, 2, 3 e 4)
- (\mathbb{Z}, \cdot) è un **monoide** commutativo (assiomi 1, 2 e 4)
- Dati due insiemi X, Y , denotiamo con Y^X l'insieme composto da tutte le funzioni da X in Y

$$Y^X : \{f : X \rightarrow Y\}$$

Allora, la coppia (X^X, \circ) è un monoide, poiché si ha:

- **Associatività**: $f, g, h : X \rightarrow X \implies h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$
- **Elemento neutro**: $\exists \text{id} \in X^X \mid \forall f \in X^X, f \circ \text{id} = \text{id} \circ f = f$ dove id è la funzione identità, ossia $\text{id}(x) = x$.

1.4 Anelli e Campi

Consideriamo un insieme A e le due operazioni di somma e prodotto, definite come:

$$+ : A \times A \rightarrow A$$

$$\cdot : A \times A \rightarrow A$$

Se tale struttura algebrica risulta essere un **gruppo abeliano** nell'operazione somma, un **monoide** nell'operazione prodotto e vale la **relazione distributiva** tra le due operazioni, allora definiamo tale struttura algebrica come **anello**.

Definition 7. Anello

Definiamo una struttura algebrica del tipo $(A, +, \cdot)$ come **anello** se:

- $(A, +)$ è un **gruppo abeliano**
- (A, \cdot) è un **monoide**
- Vale la **relazione distributiva**, definita come:

$$a(b + c) = ab + ac \quad \forall a, b, c \in A$$

Inoltre, definiamo tale struttura come **anello commutativo** se nella coppia (A, \cdot) vale anche l'assioma **commutativo**:

$$ab = ba \quad \forall a, b \in A$$

Observation 2

In un anello $(A, +, \cdot)$ applicare l'operazione prodotto tra un qualsiasi elemento $a \in A$ e l'elemento neutro 0 dell'operazione somma, restituirà l'elemento neutro 0 come risultato:

$$a \cdot 0 = 0 \quad \forall a \in A$$

Dimostrazione:

- Riscriviamo l'elemento $a \in A$ come:

$$a = a \cdot 1 = a \cdot (0 + 1) = a \cdot 0 + a \cdot 1 = a \cdot 0 + a$$

- A questo punto, abbiamo che:

$$a = a \cdot 0 + a$$

$$a + (-a) = a \cdot 0 + a + (-a)$$

$$0 = a \cdot 0$$

Se un anello commutativo A ammette anche l'assioma di elemento inverso per il prodotto, allora viene definito come campo:

Definition 8. Campo

Definiamo una struttura algebrica del tipo $(K, +, \cdot)$ come **campo** se:

- $(K, +, \cdot)$ è un **anello commutativo**
- $(K - \{0\}, \cdot)$ ammette l'assioma di **elemento inverso**, ossia se:

$$\forall a \in K - \{0\}, \exists a^{-1} \in K \mid a \cdot a^{-1} = 1$$

In un campo, sostanzialmente, si ha che anche $(K - \{0\}, \cdot)$ è un gruppo abeliano

Esempi:

- $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ è un **anello commutativo**
- $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ è un **campo**
- $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ è un **campo**

1.5 Sottogruppi ed Ideali

Definition 9. Sottogruppo

Sia (G, \cdot) un gruppo. Definiamo $H \subseteq G$ come **sottogruppo** di G se:

- $e \in G \implies e \in H$
- $x, y \in H \implies xy \in H$
- $x \in H \implies x^{-1} \in H$

Esempi:

- $(\mathbb{Z}, +) \subseteq (\mathbb{Q}, +) \subseteq (\mathbb{R}, +) \subseteq (\mathbb{C}, +)$
- $(\mathbb{Z} \setminus \{0\}, \cdot) \not\subseteq (\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot) \subseteq (\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$
- Sia A un anello. Dato $a \in A$, definiamo $I(a) : \{I(a) : \{ax \mid x \in A\}\}$, ossia l'insieme dei multipli di a in A . Dimostriamo quindi che $I(a) \subseteq A$ è sottogruppo:
 - $0 = a \cdot 0$, dunque $0 \in I(a)$
 - $x, y \in I(a) \implies \exists b, c \in A \mid x = ab, y = ac \implies x + y = ab + ac = a(b + c) \implies x + y \in I(a)$
 - $x \in I(a) \implies \exists b \in A \mid x = ab \implies -x = a(-b) \implies -x \in I(a)$

Definition 10. Ideale

Definiamo $I \subseteq A$ come **ideale** di A , dove $(A, +, \cdot)$ è un **anello commutativo**, se si verifica che:

- $(I, +) \subseteq (A, +)$ è sottogruppo
- $x \in I, a \in A \implies ax = xa \in I$ ossia se $AI = IA \subseteq I$, dove $AI : \{ax \mid x \in I, a \in A\}$ e $IA : \{xa \mid x \in I, a \in A\}$

Esempi:

- Sia $a \in A$, dove A è un anello commutativo e sia $I(a) : \{ak \mid k \in Z\}$. In tal caso, definiamo $I(a) \subseteq A$ come l'**ideale principale di A generato da a** .

Verifica delle condizioni per l'ideale:

- Abbiamo già verificato precedentemente che $(I(a), +) \subseteq (A, +)$
- Sappiamo già che $a \in A$, dunque verifichiamo che:

$$x \in I(a) \implies \exists c \in A, x = ac \implies b \in A \mid bx = bac = a(bc) \implies bx \in I(a)$$

- Siano $a_1, a_2 \in A$, dove A è un anello commutativo, e sia $I(a_1, a_2) : \{a_1b_1 + a_2b_2 \mid b_1, b_2 \in A\}$. Verifichiamo che $I(a_1, a_2) \subseteq A$ è ancora un ideale di A , che denotiamo come **ideale di A generato da a e b** :

Verifica delle condizioni per l'ideale:

- $0 = a_1 \cdot 0 + a_2 \cdot 0 \in I(a_1, a_2)$
- $x, y \in I(a_1, a_2) \implies x = a_1b_1 + a_2b_2, y = a_1c_1 + a_2c_2 \implies x + y = a_1(b_1 + c_1) + a_2(b_2 + c_2) \implies x + y \in I(a_1, a_2)$
- $x \in I(a_1, a_2) \implies x = a_1b_1 + a_2b_2 \implies -x = -a_1b_1 + a_2b_2 = a_1(-b_1) + a_2(-b_2) \implies -x \in I(a_1, a_2)$
- $x \in I(a_1, a_2) \implies x = a_1b_1 + a_2b_2 \implies c \in A \mid cx = c(a_1b_1 + a_2b_2) = a_1(b_1c) + a_2(b_2c) \implies cx \in I(a_1, a_2)$

- Analogamente ai due casi precedenti, possiamo verificare che, **più genericamente**, anche $I(a_1, \dots, a_n) : \{a_nb_1 + \dots + a_nb_n \mid b_j \in A\}$ risulta essere un'ideale di A .

Definition 11. Somma tra ideali

Dati due ideali $I, J \subseteq A$, definiamo la loro somma come:

$$I + J \subseteq A : \{i + j \mid i \in I, j \in J\}$$

Dimostrazione:

- $I + J$ è sottogruppo di A , poiché:

$$- 0 \in I \wedge 0 \in J \implies 0 = 0 + 0 \in I + J$$

$$- x, y \in I + J \implies x + y = (i_1 + j_1) + (i_2 + j_2) = (i_1 + i_2) + (j_1 + j_2) \in I + J$$

$$- x = i + j \in I + J \implies -x = -(i + j) = (-i) + (-j), -i \in I, -j \in J \implies -x \in I + J$$

- $a \in A, x \in I + J \implies ax \in I + J$, poiché:

$$a \in A \mid ai \in I, aj \in J \implies ai + aj = a(i + j) \in I + J$$

Definition 12. Intersezione tra ideali

Dati due ideali $I, J \subseteq A$, definiamo la loro intersezione come:

$$I \cap J \subseteq A : \{i \mid i \in I \wedge i \in J\}$$

Dimostrazione:

- $I \cap J$ è sottogruppo di A , poiché:

$$- 0 \in I \wedge 0 \in J \implies 0 \in I \cap J$$

$$- x, y \in I \cap J \implies x, y \in I \wedge x, y \in J \implies x + y \in I \wedge x + y \in J \implies x + y \in I \cap J$$

$$- x \in I \wedge x \in J \implies -x \in I \wedge -x \in J \implies -x \in I \cap J$$

- $a \in A, x \in I \cap J \implies ax \in I \cap J$, poiché:

$$a \in A, x \in I \cap J \implies ax \in I \wedge ax \in J \implies ax \in I \cap J$$

Definition 13. Prodotto tra ideali

Dati due ideali $I, J \subseteq A$, definiamo il loro prodotto come:

$$I \cdot J \subseteq A : \{i_1 j_1 + i_2 j_2 + \dots + i_n j_n \mid i_k \in I, j_h \in J\}$$

Dimostrazione:

- $I \cdot J$ è sottogruppo di A , poiché:

$$- 0 \in I \wedge 0 \in J \implies 0 = 0 + 0 \in I \cdot J$$

$$- x = i_1 j_1 + i_2 j_2 + \dots + i_n j_n \in I \cdot J, y = i'_1 j'_1 + i'_2 j'_2 + \dots + i'_n j'_n \in I \cdot J \implies x + y = i_1 j_1 + i'_1 j'_1 + \dots + i_n j_n + i'_n j'_n \in I \cdot J$$

$$- x \in I \cdot J \implies -x = (-i_1)j_1 + (-i_2)j_2 + \dots + (-i_n)j_n \mid -i_k \in I, j_h \in J \implies -x \in I \cdot J$$

- $a \in A, x \in I \cdot J \implies ax \in I \cdot J$, poiché:

$$a \in A, x \in I \cdot J \implies ax = (ai_1)j_1 + (ai_2)j_2 + \dots + (ai_n)j_n \implies ax \in I \cdot J$$

Capitolo 2

Numeri Complessi

Introduciamo il simbolo i con cui indichiamo l'**unità immaginaria**, avente la seguente proprietà: $i^2 = -1$. Definiamo l'insieme dei **numeri complessi** come

$$\mathbb{C} : \{a + ib \mid a, b \in \mathbb{R}\}$$

ossia l'insieme delle espressioni $z = a + ib$ composte dalla somma di una **parte reale**, indicata con $Re(z) = a$, ed una **parte immaginaria**, indicata con $Im(z) = b$.

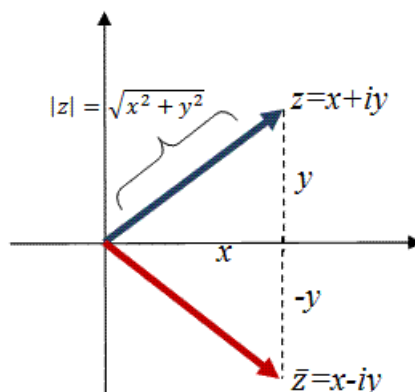
Ovviamente, da tale definizione di insieme dei numeri complessi ne segue che $\mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$, poiché $\forall a \in \mathbb{R} \implies \exists z \in \mathbb{C} \mid z = a + i \cdot 0 = a$. Inoltre, definiamo un **numero immaginario puro** come un numero nella forma $z \in \mathbb{C} \mid z = 0 + i \cdot b = ib$.

Definition 14

Definiamo come **coniugato di** z (indicato come $\bar{z} \in \mathbb{C}$) il numero complesso avente come parte immaginaria il valore inverso della parte immaginaria di z :

$$\forall z \in \mathbb{C}, \exists \bar{z} \in \mathbb{C} \mid Im(\bar{z}) = -Im(z) \implies z = a + ib, \bar{z} = a - ib$$

Poiché un numero complesso è determinato da una **coppia di valori** $a, b \in \mathbb{R} \mid z \in \mathbb{C}, z = a + ib$, possiamo rappresentare tale numero graficamente attraverso il **piano di Gauss**, avente come ascisse la **parte reale** dei numeri complessi e come ordinate la **parte immaginaria**.



Per tale motivo, dato un elemento $z \in \mathbb{C}$, definiamo come suo **valore assoluto** il numero reale corrispondente alla distanza di z stesso dall'origine, facilmente ricavabile attraverso il **teorema di Pitagora**:

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Observation 3

- Dati $z, w \in \mathbb{C} \mid z = a + ib, w = c + id$, la **somma dei loro coniugati** equivale al **coniugato della loro somma**

$$\bar{z} + \bar{w} = a - ib + c - id = (a + c) - i(b + d) = \overline{z + w}$$

- Dati $z, w \in \mathbb{C} \mid z = a + ib, w = c + id$, il **prodotto dei loro coniugati** equivale al **coniugato del loro prodotto**

$$\bar{z} \cdot \bar{w} = (a - ib)(c - id) = (ac - bd) - i(ad + bc) = \overline{zw}$$

- Dato $z \in \mathbb{C}$, il **prodotto** tra esso e il suo **coniugato** corrisponde al **quadrato del valore assoluto** di z

$$z \cdot \bar{z} = (a + ib)(a - ib) = a^2 - (ib)^2 = a^2 + b^2 = |z|^2$$

2.1 Il campo dei numeri complessi

Proposition 1

Dato insieme dei numeri complessi \mathbb{C} , si ha che $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ è un **campo**

Dimostrazione:

- Le operazioni binarie di somma e prodotto sono ben definite:

$$z, w \in \mathbb{C} \implies z + w = a + ib + c + id = (a + c) + i(b + d) \implies z + w \in \mathbb{C}$$

$$z, w \in \mathbb{C} \implies zw = (a + ib)(c + id) = (ac - bd) + i(ad + bc) \implies zw \in \mathbb{C}$$

- Per costruzione di \cdot e $+$, vale la **relazione distributiva**:

$$\forall z, w, q \in \mathbb{C} \mid z(w + q) = zw + zq$$

- È un gruppo abeliano nella somma:

– **Associatività della somma**

$$\begin{aligned} \forall z := a + bi, w := c + di, q := e + fi \in \mathbb{C} &\implies (z + w) + q = (a + bi + c + di) + e + fi \\ &= a + bi + c + di + e + fi = a + bi + (c + di + e + fi) = z + (w + q) \end{aligned}$$

– **Elemento neutro della somma**

$$\forall z \in \mathbb{C}, \exists! 0 \in \mathbb{C} \mid z + 0 = a + bi + 0 = a + bi = z$$

– **Elemento inverso della somma**

$$\forall z \in \mathbb{C}, \exists! -z \in \mathbb{C} \mid z + (-z) = a + bi + (-a - bi) = 0$$

– **Commutatività della somma**

$$\forall z, w \in \mathbb{C} \mid z + w = a + bi + c + di = c + di + a + bi = w + z$$

• È un gruppo abeliano nel prodotto:

– **Associatività del prodotto**

$$\begin{aligned} \forall z := a+bi, w := c+di, q := e+fi \in \mathbb{C} &\implies (zw)q = [(a+bi) \cdot (c+di)] \cdot (e+fi) = \\ &= (a+bi) \cdot (c+di) \cdot (e+fi) = (a+bi) \cdot [(c+di) \cdot (e+fi)] = z(wq) \end{aligned}$$

– **Elemento neutro del prodotto**

$$\forall z \in \mathbb{C}, \exists! 1 \in \mathbb{C} \mid z \cdot 1 = (a+bi) \cdot 1 = a+bi = z$$

– **Elemento inverso del prodotto:** l'inverso $z^{-1} = \frac{1}{a+ib}$ non risulta apparire nella forma $c+id \mid c, d \in \mathbb{R}$. Riscriviamo quindi z^{-1} come:

$$z = a + ib \implies z^{-1} = \frac{1}{z} = \frac{\bar{z}}{z \cdot \bar{z}} = \frac{\bar{z}}{|z|^2} = \frac{a - ib}{a^2 + b^2} = \frac{a}{a^2 + b^2} + i \cdot \frac{-b}{a^2 + b^2}$$

Ponendo $c := \frac{a}{a^2+b^2} \in \mathbb{R}$ e $d := \frac{-b}{a^2+b^2} \in \mathbb{R}$, otteniamo che $z^{-1} = c + id \in \mathbb{C}$. Quindi l'assioma è verificato per:

$$\forall z \in \mathbb{C} - \{0\}, \exists! z^{-1} := \frac{\bar{z}}{z \cdot \bar{z}} \mid z \cdot z^{-1} = 1$$

– **Commutatività del prodotto**

$$\forall z, w \in \mathbb{C} \mid z + w = a + bi + c + di = c + di + a + bi = w + z$$

2.2 Forma polare dei numeri complessi

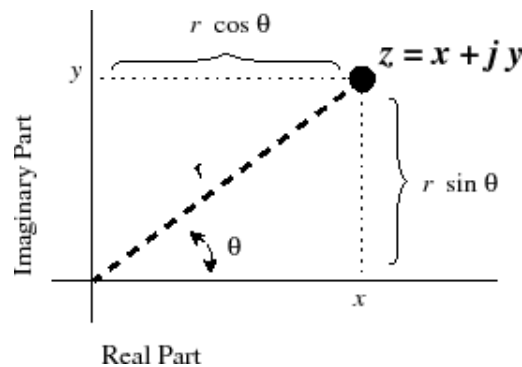
Inoltre, abbiamo visto come un numero complesso possa essere espresso come un punto sul piano gaussiano tramite una **coppia di valori**, descrivendo la distanza di tale punto dall'origine del piano $(0,0)$ come $|z|$.

Possiamo quindi descrivere una **circonferenza di raggio** $r = |z|$ rappresentante tutti i numeri complessi aventi la stessa distanza dall'origine, dove θ corrisponde all'**arco in radianti** descritto dal **vettore** costruito attraverso le due coordinate gaussiane rappresentate da z .

Dunque, se $r = |z|$, abbiamo che:

$$r = |z| \implies \begin{cases} a = r \cdot \cos(\theta) \\ b = r \cdot \sin(\theta) \end{cases} \implies \begin{cases} \cos(\theta) = \frac{a}{r} = \frac{a}{|z|} \\ \sin(\theta) = \frac{b}{r} = \frac{b}{|z|} \end{cases}$$

Graficamente, ciò corrisponde a dire che:



Tuttavia, ricordando le proprietà delle funzioni seno e coseno, notiamo come il sistema imposto ammetta **infinite soluzioni**, poiché se θ è una soluzione allora anche $\theta + 2k\pi$, $k \in \mathbb{Z}$ è soluzione del sistema.

Per tale motivo, ogni soluzione valida viene detta **argomento di z** e, in particolare, esiste **un solo argomento principale** tale che $0 \leq \theta \leq 2\pi$. Definiamo quindi come $\arg(z)$ l'insieme contenente tutti gli argomenti di z , mentre definiamo come $\text{Arg}(z)$ l'argomento principale di z .

Considerato il sistema imposto, dato un numero $z = a + ib \in \mathbb{C}$, possiamo riscrivere tale numero complesso nella sua **forma polare**, ossia

Definition 15. Forma polare dei numeri complessi

Dato un numero complesso $z := a + ib \in \mathbb{C}$, definiamo come **forma polare** di tale numero come:

$$z = r(\cos(\theta) + i \cdot \sin(\theta))$$

dove $r = |z|$ e $\theta = \text{Arg}(z)$.

Utilizziamo anche la **notazione contratta**:

$$e^{i\theta} := \cos(\theta) + i \cdot \sin(\theta)$$

dunque:

$$z = re^{i\theta}$$

Giustificazione per la notazione contratta:

- Matematicamente, tramite le proprietà degli esponenti abbiamo che

$$e^{i\theta_1} \cdot e^{i\theta_2} = e^{i(\theta_1 + \theta_2)}$$

- Svolgiamo ora tale calcolo tramite la notazione esplicita

$$(\cos(\theta_1) + i \cdot \sin(\theta_1)) \cdot (\cos(\theta_2) + i \cdot \sin(\theta_2)) =$$

$$[\cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) - \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2)] + i \cdot [\cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) + \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2)] =$$

- Tramite le proprietà trigonometriche, in particolare $\cos(a+b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b)$ e $\sin(a+b) = \cos(a)\sin(b) + \sin(a)\cos(b)$, riscriviamo tale espressione come:

$$\cos(\theta_1 + \theta_2) + i \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

- Riscrivendo il risultato nella forma contratta, otteniamo che i due calcoli matematici risultano essere equivalenti tra di loro:

$$\cos(\theta_1 + \theta_2) + i \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) = e^{i(\theta_1 + \theta_2)}$$

L'uso di tale notazione ci permette di svolgere in modo rapido operazioni tra numeri complessi, in particolare tramite la **formula di De Moivre**:

Definition 16. Formula di De Moivre

Dato $z \in \mathbb{C}$, si ha che:

$$z = re^{i\theta} \implies z^n = (re^{i\theta})^n = r^n e^{in\theta}$$

Esempi:

1. Dato $z = -i$, calcolare z^4 .

- Calcoliamo l'argomento principale di z : $|z| = \sqrt{0^2 + (-1)^2} = 1$

$$\begin{cases} \cos(\theta) = \frac{0}{1} = 0 \\ \sin(\theta) = \frac{-1}{1} = -1 \end{cases} \implies \text{Arg}(z) = \frac{3}{2}\pi \implies \arg(z) = \text{Arg}(z) + 2k\pi, k \in \mathbb{Z}$$

- Quindi, riscriviamo z come

$$z = re^{\text{Arg}(z) \cdot i} = e^{\frac{3}{2}\pi \cdot i}$$

- A questo punto, z^4 corrisponderà a:

$$z^4 = e^{4 \cdot \frac{3}{2}\pi \cdot i} = e^{6\pi \cdot i} = e^{0 \cdot i} = 1$$

2. Dato $z = 1 - i$, calcolare z^{10} .

- Calcoliamo l'argomento principale di z : $|z| = \sqrt{1^2 + (-1)^2} = \sqrt{2}$

$$\begin{cases} \cos(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sin(\theta) = \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{cases} \implies \text{Arg}(z) = \frac{7}{4}\pi \implies \arg(z) = \text{Arg}(z) + 2k\pi, k \in \mathbb{Z}$$

- Quindi, riscriviamo z come

$$z = re^{\text{Arg}(z) \cdot i} = \sqrt{2}e^{\frac{7}{4}\pi \cdot i}$$

- A questo punto, z^{10} corrisponderà a:

$$z^{10} = (\sqrt{2})^{10} e^{10 \cdot \frac{7}{4} \pi \cdot i} = 2^5 e^{\frac{35}{2} \pi \cdot i} = 2^5 e^{(16\pi + \frac{3}{2}\pi) \cdot i} = 2^5 e^{\frac{3}{2} \pi i}$$

- Siccome abbiamo visto che $e^{\frac{3}{2} \pi i} = -i$, allora riscriviamo z^{10} come:

$$z^{10} 2^5 e^{\frac{3}{2} \pi i} = -2^5 i$$

2.3 Teorema fondamentale dell'algebra

Considerati due numeri z e n dove $z \in \mathbb{C}$ e $n \in \mathbb{N}, n \geq 2$, ci chiediamo quante siano le **soluzioni complesse dell'equazione** $x^n = z$.

Nel caso in cui $z = 0$, l'unica soluzione risulta essere $x = 0$. Nel caso in cui $z \neq 0$, invece, esistono n **distinte soluzioni**.

Utilizzando la formula di De Moivre, possiamo riscrivere tale espressione come:

$$\begin{aligned}x^n &= z \\x &= \sqrt[n]{z} \\x &= z^{\frac{1}{n}} \\x &= r^{\frac{1}{n}} e^{\frac{1}{n} \theta i}\end{aligned}$$

Abbiamo quindi trovato **una soluzione valida** per l'equazione. Tuttavia, ricordando che un numero complesso z possiede **infiniti argomenti**, riscriviamo x come:

$$x = r^{\frac{1}{n}} e^{i(\frac{\theta}{n} + \frac{2k\pi}{n})}$$

A questo punto, al variare di $k = 0, 1, \dots, n-1$ otteniamo le n **soluzioni all'equazione**. Difatti, quando $k = n$, riotteniamo la prima soluzione dell'equazione, mentre quando $k = n+1$ otteniamo la seconda, e così via.

Esempio:

Dato $z = i$, vogliamo sapere le soluzioni dell'equazione $x^3 = z$.

$$\begin{aligned}x^3 = i &\implies x^3 = e^{\frac{1}{2} \pi i} \\x &= e^{i(\frac{1}{2 \cdot 3} \pi + \frac{2k\pi}{3})}\end{aligned}$$

- Se $k = 0$

$$x_1 = e^{i(\frac{1}{2 \cdot 3} \pi)} = e^{\frac{1}{6} \pi i}$$

- Se $k = 1$

$$x_2 = e^{i(\frac{1}{2 \cdot 3} \pi + \frac{2\pi}{3})} = e^{\frac{5}{6} \pi i}$$

- Se $k = 2$

$$x_3 = e^{i(\frac{1}{2 \cdot 3} \pi + \frac{4\pi}{3})} = e^{\frac{9}{6} \pi i} = e^{\frac{3}{2} \pi i}$$

- Se $k = 3$

$$x_4 = e^{i(\frac{1}{2 \cdot 3}\pi + \frac{6\pi}{3})} = e^{i(\frac{1}{6}\pi + 2\pi)} = e^{\frac{1}{6}\pi i} \implies x_4 = x_1$$

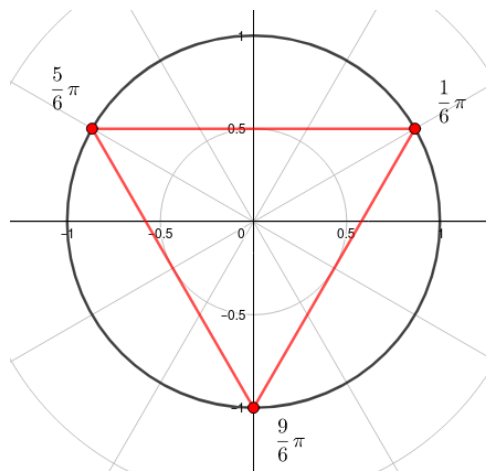
- Se $k = 4$

$$x_5 = e^{i(\frac{1}{2 \cdot 3}\pi + \frac{8\pi}{3})} = e^{i(\frac{1}{6}\pi + \frac{2\pi}{3} + 2\pi)} = e^{\frac{5}{6}\pi i} \implies x_5 = x_2$$

- ...

Notiamo quindi che nonostante esistano **infiniti argomenti di z** , le soluzioni risultano essere cicliche tra di loro, risultando in solo **3 soluzioni valide per l'equazione**.

Inoltre, graficando sul piano di Gauss le tre radici soluzioni dell'equazione, notiamo come ognuna di esse corrisponda al vertice di un triangolo equilatero inscritto in una circonferenza di raggio 1:



Observation 4

Le n radici n -esime di un numero complesso corrispondono ai vertici di un poligono regolare di n lati inscritto in una circonferenza di raggio $|z|^{\frac{1}{n}}$.

Infine, concludiamo il nostro studio sui numeri complessi affermando il seguente **teorema fondamentale dell'algebra**

Theorem 2. Teorema fondamentale dell'algebra

Dato un polinomio del tipo:

$$p(x) := a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n = 0$$

dove $a_i \in \mathbb{C}, n \geq 1, a_n \neq 0$, **esistono sempre n radici complesse** di $p(x)$:

$$\exists x_1, \dots, x_n \in \mathbb{C} \mid p(x_i) = 0$$

Capitolo 3

Relazioni e Induzione

Dato un insieme S , definiamo come **relazione** R su S un **sottoinsieme del prodotto cartesiano** $S \times S$:

$$R \subseteq S \times S \iff R \subseteq \{(x, y) \mid x, y \in S\}$$

Data una coppia (x, y) , se essa appartiene alla relazione R allora affermiamo ciò con la notazione $x \sim y$ (oppure con $R(x, y)$), altrimenti affermiamo che essa non appartiene alla relazione con la notazione $x \not\sim y$ (oppure con $\neg R(x, y)$).

$$x \sim y \implies (x, y) \in R \quad x \not\sim y \implies (x, y) \notin R$$

Tra le varie proprietà che possono essere soddisfatte da una relazione, in particolare evidenziamo:

- **Riflessività:** $x \sim x, \forall x \in S$
- **Simmetria:** $x \sim y \implies y \sim x, \forall x, y \in S$
- **Anti-simmetria:** $x \sim y \wedge y \sim x \implies x = y, \forall x, y \in S$
- **Transitività:** $x \sim y \wedge y \sim z \implies x \sim z, \forall x, y, z \in S$

Definition 17. Relazione di equivalenza

Una relazione viene detta **relazione di equivalenza** se su di essa valgono le proprietà di **riflessività**, **simmetria** e **transitività**.

Esempi:

- La relazione di eguaglianza $a \sim b \iff a = b$ è una relazione di equivalenza
- Dato l'insieme X corrispondente ad un insieme di automobili, la relazione $a \sim b \iff a \text{ ha lo stesso colore di } b$ è una relazione di equivalenza

Definition 18. Relazione d'ordine

Una relazione viene detta **relazione d'ordine parziale** se su di essa valgono le proprietà di **riflessività**, **anti-simmetria** e **transitività**.

Nel caso in cui $\forall x, y \in S$ vale $x \sim y \vee y \sim x$, definiamo tale relazione come **relazione d'ordine totale**.

Esempi:

- La relazione di minor-eguaglianza $a \sim \iff a \leq b$ è una relazione d'ordine
- La relazione di precedenza $a \sim b \iff a \prec b$ è una relazione d'ordine totale
- Dato un insieme X , definiamo come $P(X)$ l'insieme contenente tutte le delle parti (ossia i sottoinsiemi) di X

$$P(X) = \{\text{tutti i sottoinsiemi di } X\}$$

La relazione \subseteq su $P(X)$ risulta essere una relazione d'ordine parziale, poiché:

- Ogni sottoinsieme A è sottoinsieme di se stesso (riflessività):

$$A \subseteq A \quad \forall A \in P(X)$$

- Se un sottoinsieme A è sottoinsieme di B e B è sottoinsieme di A , allora ciò è possibile solo se A e B sono lo stesso sottoinsieme (anti-simmetria):

$$A \subseteq B \wedge B \subseteq A \implies A = B$$

- Se un sottoinsieme A è sottoinsieme di B e B è sottoinsieme di C , allora anche A è sottoinsieme di C (transitività):

$$A \subseteq B \wedge B \subseteq C \implies A \subseteq C$$

- Non tutti i sottoinsiemi sono confrontabili tra loro (ordine non totale), ad esempio $\{1\} \not\subseteq \{2\}$

3.1 Classi di equivalenza**Definition 19**

Data una relazione d'equivalenza \sim definita su un insieme S , denotiamo con $[x]$ la sua **classe di equivalenza**, dove $[x] \subseteq S$ e $x \in S$, l'insieme di tutti gli elementi in relazione con x :

$$[x] = \{y \in S \mid x \sim y\}$$

Observation 5

Ogni classe di equivalenza possiede **almeno un elemento**, poiché per riflessività vale che $x \sim x \implies x \in [x]$

Observation 6

Tutte le classi di equivalenza indotte da una relazione su un insieme X **sono disgiunte tra loro**

Dimostrazione:

- Supponendo $x \sim y$, se $z \in [x] \implies z \sim x$ allora $z \sim y \implies z \in [y]$, dunque $[x] \subseteq [y]$. Effettuando il ragionamento opposto, ne traiamo che $[y] \subseteq [x]$ e dunque che

$$x \sim y \iff [x] = [y]$$

- Supponiamo per assurdo che $z \in [x] \cap [y]$. Ciò significa che $z \in [x] \wedge z \in [y] \iff z \sim x \wedge z \sim y$. Poiché per simmetria si ha che $z \sim x \iff x \sim z$, per transitività concludiamo che $x \sim z, z \sim y \implies x \sim y$. Dunque, concludiamo che:

$$x \not\sim y \iff [x] \cap [y] = \emptyset$$

Definition 20. Insieme quoziente

Data una relazione di equivalenza $x \sim y$, definiamo l'insieme di tutte le classi di equivalenza indotte sull'insieme X come

$$X/\sim: \{[x] \mid x \in X\}$$

Definition 21. Partizionamento di un insieme

Dato un insieme X e un insieme di n indici $I: \{0, \dots, n\}$, una **partizione di X** è un sottoinsieme di X disgiunto da tutte le altre partizioni di X :

$$X = \bigcup_{i \in I} X_i \text{ dove } i \neq j \implies X_i \cap X_j = \emptyset$$

Denotiamo il partizionamento di un insieme X con il simbolo di **unione disgiunta** (ossia unione di insiemi disgiunti):

$$X = \coprod_{i \in I} X_i$$

Proposition 3

Applicare una **relazione di equivalenza** su un insieme equivale a **partizionare** tale insieme, poiché ogni classe di equivalenza è un sottoinsieme di X disgiunto da tutte le altre classi.

$$X = \coprod_{[x] \in X/\sim} [x]$$

Inoltre, dato un partizionamento di X , otteniamo una relazione di equivalenza \sim su di esso:

- **Riflessività:**

$$\forall x \in X, \exists i \in I \mid x \in X_i \implies x \sim x$$

- **Simmetria:**

$$x \sim y, \exists i, j \in I \mid x, y \in X_i \implies x, y \in X_j \implies y \sim x$$

- **Transitività:**

$$x \sim y, y \sim z, \exists i, j \in I \mid x, y \in X_i, y, z \in X_j \implies y \in X_i \cap X_j$$

Tuttavia, poiché le partizioni sono disgiunte tra loro, abbiamo che $i \neq j \implies X_i \cap X_j = \emptyset$, quindi si può verificare solo che $i = j \implies X_i = X_j$, dunque otteniamo che $x \sim z$.

Proposition 4. Proiezione al quoziente

Applicare una relazione di equivalenza su un insieme X equivale all'applicazione di una funzione suriettiva detta **proiezione al quoziente**:

$$\rho : X \rightarrow X/\sim : x \mapsto [x]$$

3.2 Relazione di Divisore

Definition 22. Relazione di divisore

Dati due numeri naturali $m, n \in \mathbb{Z}$, affermiamo che " m è divisore di n ", indicato come $m \mid n$ (*Attenzione: non è il simbolo matematico "tale che"*), se esiste un elemento $p \in \mathbb{Z} \mid m \cdot p = n$:

$$m \mid n \iff \exists p \in \mathbb{Z} m \cdot p = n$$

Analizziamo le proprietà della relazione definita:

- Soddisfa la **riflessività**:

$$m \mid m \quad \forall m \in \mathbb{Z} \implies m \cdot 1 = m$$

- Soddisfa la **transitività**:

$$d \mid m \implies \exists p \in \mathbb{Z}, d \cdot p = m$$

$$m \mid n \implies \exists q \in \mathbb{Z}, m \cdot q = n$$

$$d \mid m, m \mid n \implies n = m \cdot q = d \cdot p \cdot q = d \cdot (pq) \implies d \mid n$$

- Non soddisfa l'**anti-simmetria**:

$$m \mid n \implies \exists p \in \mathbb{Z}, m \cdot p = n$$

$$n \mid m \implies \exists q \in \mathbb{Z}, n \cdot q = m$$

$$m \mid n, n \mid m \implies m = n \cdot q = m \cdot p \cdot q$$

a questo punto, si hanno due casi:

- $m = 0 \implies n = p = q = 0$
- $m \neq 0 \implies p \cdot q = 1 \implies p = q = \pm 1$
 - * Se $p = q = 1 \implies m = n$
 - * Se $p = q = -1 \implies m = -n$

Dunque, deduciamo che non in tutti i casi la relazione \mid risulta essere anti-simmetrica.

- Nel caso in cui la relazione venisse applicata su \mathbb{N} invece che \mathbb{Z} , il caso in cui $p = q = -1$ verrebbe scartato, poiché $-1 \notin \mathbb{N}$, rendendo quindi la relazione anti-simmetrica e, di conseguenza, anche una relazione d'ordine parziale.

3.3 Relazione di Congruenza

Definition 23. Relazione di congruenza

Dato $n \in \mathbb{N}, n \geq 2$ e dati $a, b \in \mathbb{Z}$ denotiamo con $a \equiv b \pmod{n}$ la relazione "a è congruente b modulo n" se e solo se $n \mid b - a$

$$a \equiv b \pmod{n} \iff n \mid (b - a)$$

Esempi:

- $7 \equiv 22 \pmod{5} \implies n \mid b - a \implies 5 \mid (22 - 7) \implies 5 \mid 15$
- $7 \equiv 2 \pmod{5} \implies n \mid b - a \implies 5 \mid (2 - 7) \implies 5 \mid -5$

La relazione risulta essere una relazione di equivalenza:

- **Riflessiva:**

$$0 = n \cdot 0 \implies n \mid 0 \implies n \mid a - a \implies a \equiv a \pmod{n} \quad \forall a \in \mathbb{Z}$$

- **Simmetrica:**

$$\begin{aligned} a \equiv b(\bmod n) &\implies n \mid b - a \implies \exists p \in \mathbb{Z}, b - a = n \cdot p \implies \\ &\implies a - b = n \cdot (-p) \implies n \mid a - b \implies b \equiv a(\bmod n) \end{aligned}$$

- **Transitiva:**

Siccome:

$$a \equiv b(\bmod n), b \equiv c(\bmod n) \implies b - a = n \cdot p, c - b = n \cdot q$$

allora:

$$c - a = (c - b) + (b - a) = q \cdot n + p \cdot n = n(q + p) \implies n \mid c - a \implies a \equiv c(\bmod n)$$

3.4 Teorema della divisione con resto euclidea

Theorem 5. Teorema della divisione con resto euclidea

Dati due interi $m, n \in \mathbb{Z}$ dove $n > 0$, allora

$$\exists! q, r \in \mathbb{Z} \mid m = nq + r, 0 \leq r < n$$

dove q viene definito come **quoziente** e r come **resto** della divisione

Dimostrazione dell'unicità:

- Supponiamo che q ed r non siano unici. Allora, ne segue che:

$$nq_1 + r_1 = m = nq_2 + r_2 \implies r_2 - r_1 = n(q_1 - q_2) \implies n \mid r_2 - r_1$$

- Siccome $0 \leq r_1, r_2 < n \implies -n < r_2 - r_1 < n$ e siccome $n \mid r_2 - r_1$, ciò significa che $r_2 - r_1$ deve essere un multiplo di n compreso tra $-n$ ed n stesso. Poiché l'unico numero rispettante tali caratteristiche è 0, ne segue che:

$$r_2 - r_1 = 0 \implies r_2 = r_1$$

- Quindi, otteniamo che:

$$nq_1 + r_1 = nq_2 + r_2 \implies nq_1 = nq_2 \implies q_1 = q_2$$

Dimostrazione dell'esistenza:

- Sia $[m]$ la **classe di congruenza** di $m(\bmod n)$:

$$[m] : \{a \in \mathbb{Z} \mid a \equiv m(\bmod n)\}$$

- Allora, abbiamo che:

$$n \mid m - a \implies m - a = n \cdot p \implies a = m - np$$

- Sia r il minimo valore tra le $a \in [m]$, dove $a > 0$. Quindi, vale che

$$\exists r \in \mathbb{Z} \mid r = m - nq \implies m = nq - r$$

- Verifichiamo ora che $0 \leq r < n$. Assumiamo per assurdo che $r \geq n$, allora ne segue che $r - n \geq 0$. Quindi abbiamo che:

$$r - n = (m - nq) - n = m - (q+1)n \implies m - (q+1)n \in [m] \implies r \text{ non è il minimo valore}$$

3.5 Relazione di Coniugio

Definition 24. Relazione di coniugio

Dato un gruppo G e dati $g, h \in G$, diciamo che " g è coniugato di h " se si verifica che:

$$g \sim h \iff \exists a \in G \mid h = aga^{-1}$$

Observation 7

Se G è un gruppo abeliano, allora si ha che:

$$g \sim h \iff h = aga^{-1} = aa^{-1}g = g$$

Observation 8

La relazione di coniugio è una relazione di equivalenza.

Dimostrazione:

- **Riflessività:**

$$g = 1 \cdot g \cdot 1^{-1} \implies g \sim g$$

- **Simmetria:**

$$g \sim h \implies h = aga^{-1} \implies a^{-1}ha = a^{-1}aga^{-1}a \implies a^{-1}ha = g$$

ponendo $b := a^{-1}$, si ha che:

$$bhb^{-a} = g \implies h \sim g$$

- **Transitività:**

$$g \sim h \wedge h \sim k \implies h = aga^{-1}, k = bhb^{-1} \implies k = b(aga^{-1})b^{-1} = (ba)g(a^{-1}b^{-1})$$

ponendo $c := ba$, si ha che:

$$k = cgc^{-1} \implies g \sim k$$

3.6 Induzione matematica

Vogliamo dimostrare una successione di n proposizioni, etichettate come $p_1), p_2), \dots, p_n)$. Supponiamo di aver dimostrato la proposizione $p_1)$, che denominiamo come **caso base**. Se le prime $p_1), \dots, p_n)$ sono vere, allora anche la proposizione $p_{n+1})$ è vera (**passo induttivo**).

Per esprimere tale concetto matematicamente, possiamo dire che:

Definition 25. Principio di induzione

Data una successione di proposizioni $p_1), \dots, p_n)$, si ha che:

$$\begin{aligned} p_1) &\implies p_2) \\ p_1), p_2) &\implies p_3) \\ &\dots \\ p_1), \dots, p_n) &\implies p_{n+1} \end{aligned}$$

Esempi:

1. • Vogliamo verificare che la proposizione seguente proposizione sia vera $\forall n \geq 1$:

$$1 + 2 + 3 + \dots + (n - 1) + n = \frac{n(n + 1)}{2}$$

- Verifichiamo quindi il **caso base** $p_1)$, ossia $n = 1$

$$1 = \frac{1(1 + 1)}{2} = \frac{2}{2}$$

che risulta essere vero

- A questo punto, assumiamo per **ipotesi induttiva** che $p_n)$ sia vera.
- Impostiamo quindi il **passo induttivo**, ossia $p_{n+1})$:

$$1 + 2 + 3 + \dots + n + (n + 1) = \frac{(n + 1)(n + 1 + 1)}{2}$$

- Notiamo come il **passo induttivo contenga al suo interno l'ipotesi induttiva stessa**, che abbiamo affermato essere vera:

$$\underbrace{1 + 2 + 3 + \dots + n}_{\text{Ipotesi induttiva}} + (n + 1) = \frac{(n + 1)(n + 1 + 1)}{2}$$

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

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

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

dunque anche il passo induttivo risulta essere vero, concludendo che **la proposizione p_n sia valida $\forall n \geq 1$**

2. • La funzione di Fibonacci è definita come:

$$\begin{cases} F_0 = 0 & \text{se } n = 0 \\ F_1 = 1 & \text{se } n = 1 \\ F_n = F_{n-1} + F_{n+2} & \text{se } n \geq 2 \end{cases}$$

- Le costanti φ e ψ , corrispondenti alle soluzioni dell'equazione $x^2 = x + 1$, sono definite come:

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad \psi = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}$$

- Vogliamo verificare per induzione che la seguente proposizione sia vera $\forall n$:

$$F_n = \frac{\varphi^n - \psi^n}{\varphi - \psi}$$

- Verifichiamo quindi p_0) e p_1 :

$$F_0 = \frac{\varphi^0 - \psi^0}{\varphi - \psi} = \frac{1 - 1}{\varphi - \psi} = 0$$

$$F_1 = \frac{\varphi^1 - \psi^1}{\varphi - \psi} = \frac{\varphi - \psi}{\varphi - \psi} = 1$$

- Assumiamo quindi per ipotesi induttiva che p_{n-1}) sia vera e verifichiamo il passo induttivo p_n , utilizzando però la definizione originale di F_n :

$$F_n = F_{n-1} + F_{n+2} = \frac{\varphi^{n-1} - \psi^{n-1}}{\varphi - \psi} + \frac{\varphi^{n-2} - \psi^{n-2}}{\varphi - \psi} = \frac{\varphi^{n-2}(\varphi + 1) - \psi^{n-2}(\psi + 1)}{\varphi - \psi}$$

- Siccome per definizione stessa $\varphi^2 = \varphi + 1$ e $\psi^2 = \psi + 1$, allora abbiamo che:

$$F_n = F_{n-1} + F_{n+2} = \frac{\varphi^{n-2}\varphi^2 - \psi^{n-2}\psi^2}{\varphi - \psi} = \frac{\varphi^n - \psi^n}{\varphi - \psi}$$

verificando quindi la validità del passo induttivo

3. • Vogliamo dimostrare per induzione l'identità binomiale di Newton, definita come:

$$(a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k}$$

dove il coefficiente binomiale è definito come:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{(n-k)! \cdot k!}$$

- Verifichiamo quindi il caso base:

$$1 = (a + b)^0 = \sum_{k=0}^0 \binom{0}{k} a^k b^{0-k} = \binom{0}{0} a^0 b^{0-0} = 1$$

- A questo punto effettuiamo il passo induttivo:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} a^k b^{n+1-k} &= (a + b)^{n+1} = (a + b)(a + b)^n = \\ &= (a + b) \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^{k+1} b^{n-k} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k+1} = \end{aligned}$$

- Trasliamo di -1 l'indice della prima sommatoria e portiamo fuori il suo ultimo termine:

$$\begin{aligned} &= \sum_{k=1}^{n+1} \binom{n}{k-1} a^k b^{n+1-k} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k+1} = \\ &= \binom{n}{n+1-1} a^{n+1} b^{n+1-(n+1)} + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k-1} a^k b^{n+1-k} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k+1} = \\ &= a^{n+1} + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k-1} a^k b^{n+1-k} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k+1} = \end{aligned}$$

- Nella seconda sommatoria, invece, portiamo fuori il primo termine, in modo che gli indici di entrambe le sommatorie coincidano:

$$\begin{aligned} &= a^{n+1} + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k-1} a^k b^{n+1-k} + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k+1} + \binom{n}{0} a^0 b^{n-0+1} = \\ &= a^{n+1} + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k-1} a^k b^{n+1-k} + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k+1} + b^{n+1} = \end{aligned}$$

- A questo punto uniamo nuovamente le due sommatorie:

$$= a^{n+1} + b^{n+1} + \sum_{k=1}^n \left[\binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} \right] a^k b^{n-k+1} =$$

- Per le proprietà dei coefficienti binomiali (facilmente verificabili) si ha che $\binom{n+1}{k} = \binom{n}{k-1} + \binom{n}{k}$, dunque riscriviamo la sommatoria come:

$$= a^{n+1} + b^{n+1} + \sum_{k=1}^n \binom{n+1}{k} a^k b^{n-k+1} =$$

- A questo punto, poiché $\binom{n}{0} = \binom{n}{n+1} = 1$, riscriviamo i due termini esterni alla sommatoria in modo da poterli reinserire in essa, ottenendo il risultato cercato:

$$= \binom{n+1}{n+1} a^{n+1} + \binom{n+1}{0} b^{n+1} + \sum_{k=1}^n \binom{n+1}{k} a^k b^{n-k+1} = \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} a^k b^{n+1-k}$$

Capitolo 4

Elementi di Teoria degli Anelli

4.1 Insieme quoziente

4.1.1 Classi laterali sinistre

Sia (G, \cdot) un gruppo e sia $H \subseteq G$ sottogruppo. Definiamo la seguente relazione $x \sim y \iff x^{-1}y \in H$, verificando che essa sia una relazione di equivalenza:

- **Riflessività:**

$$x \sim x \implies x^{-1}x = 1 \in H$$

- **Simmetria:**

$$x \sim y \implies h := x^{-1}y \in H \implies h^{-1} := y^{-1}x \in H \implies y \sim x$$

- **Transitività:**

$$\begin{aligned} x \sim y, y \sim z &\implies h := x^{-1}y, k := y^{-1}z \in H \implies \\ &\implies hk = x^{-1}yy^{-1}z = x^{-1}z \implies x^{-1}z \in H \end{aligned}$$

Definiamo quindi un particolare tipo di classi di equivalenza:

Definition 26. Classi laterali sinistre

Data la relazione di equivalenza $x \sim y \iff x^{-1}y \in H$, definiamo come **classi laterali sinistre** di G in H le classi di equivalenza generate da tale relazione:

$$x \in G, [x] = \{y \in G \mid x \sim y\}$$

Denotiamo come G/H (pronunciato G modulo H) l'insieme quoziente di tutte le classi laterali sinistre generate da H su G .

Esempio:

- Sia $I(3) \subseteq \mathbb{Z}$ il sottogruppo contenente tutti i multipli di 3. In tal caso, l'insieme quoziente $\mathbb{Z}/I(3)$ verrà partizionato in tre classi laterali sinistre:

$$\mathbb{Z}/I(3) : \{[0], [1], [2]\}$$

In particolare, notiamo come:

- $0 \in [0]$, poiché $0 \sim 0 \iff -0 + 0 = 0 = 3 \cdot 0 \in I(3)$
- $1 \in [1]$, poiché $1 \sim 1 \iff -1 + 1 = 0 = 3 \cdot 0 \in I(3)$
- $2 \in [2]$, poiché $2 \sim 2 \iff -2 + 2 = 0 = 3 \cdot 0 \in I(3)$
- $3 \in [3]$, poiché $3 \sim 3 \iff -3 + 3 = 0 = 3 \cdot 0 \in I(3)$
- $4 \in [1]$, poiché $4 \sim 1 \iff -4 + 1 = -3 = 3 \cdot (-1) \in I(3)$
- $5 \in [2]$, poiché $5 \sim 2 \iff -5 + 2 = -3 = 3 \cdot (-1) \in I(3)$
- $6 \in [3]$, poiché $6 \sim 3 \iff -6 + 3 = -3 = 3 \cdot (-1) \in I(3)$
- $7 \in [1]$, poiché $7 \sim 1 \iff -7 + 1 = -6 = 3 \cdot (-2) \in I(3)$
- $8 \in [2]$, poiché $8 \sim 2 \iff -8 + 2 = -6 = 3 \cdot (-2) \in I(3)$
- $9 \in [3]$, poiché $9 \sim 3 \iff -9 + 3 = -6 = 3 \cdot (-2) \in I(3)$
- ...

- Più in generale, si verifica che:

$$\mathbb{Z}/I(n) : \{[0], \dots, [n-1]\}$$

Definition 27. Insieme quoziente \mathbb{Z}_n

Dato il gruppo abeliano $(\mathbb{Z}, +)$ e il sottoinsieme $I(n) : \{nk \mid k \in \mathbb{Z}\}$, l'insieme quoziente $\mathbb{Z}/I(n)$ **coincide** con l'insieme di classi di equivalenza indotto dalla relazione di congruenza (\mathbb{Z}/\equiv) .

Tale particolare insieme quoziente viene indicato come **insieme \mathbb{Z}_n**

$$\mathbb{Z}_n := \mathbb{Z}/I(n) = \mathbb{Z}/\equiv = \{[0], \dots, [n-1]\}$$

Dimostrazione:

- Abbiamo già dimostrato che $I(n) \subseteq \mathbb{Z}$ è sottogruppo
- Applicando la relazione delle classi laterali sinistre su $I(n)$, in tal caso otteniamo che:

$$\begin{aligned} a \sim b &\implies (-a) + b = b - a \in I(n) \implies b - a = nk, \exists k \in \mathbb{Z} \implies \\ &\implies n \mid b - a \implies a \equiv b \pmod{n} \end{aligned}$$

- Procedendo all'inverso, otteniamo che:

$$\begin{aligned} a \equiv b \pmod{n} &\implies n \mid b - a \implies b - a = nk, \exists k \in \mathbb{Z} \implies \\ &\implies b - a = (-a) + b \in I(n) \implies a \sim b \end{aligned}$$

Observation 9

Ogni classe laterale sinistra appartenente a G/H corrisponde all'insieme:

$$[x] = xH = \{xh \mid h \in H\}$$

Dimostrazione:

- Dimostriamo che $[x] \subseteq xH$:

$$y \in [x] \implies x \sim y \implies h := x^{-1}y \in H$$

Allora abbiamo che:

$$\begin{aligned} h &= x^{-1}y \\ xh &= x(x^{-1}y) \\ xh &= y \end{aligned}$$

Dunque, abbiamo che $y \in xH \implies [x] \subseteq xH$

- Dimostriamo che $xH \subseteq [x]$:

$$y \in xH \implies \exists h \in H, y = xh$$

Allora abbiamo che:

$$\begin{aligned} y &= xh \\ x^{-1}y &= x^{-1}(xh) \\ x^{-1}y &= h \end{aligned}$$

Dunque, abbiamo che $x^{-1}y = h \in H \implies x \sim y \implies y \in [x] \implies xH \subseteq [x]$

Observation 10

Tutte le classi laterali sinistre di H su G hanno la **stessa cardinalità**, corrispondente a $|H|$.

Dimostrazione:

- Poiché $[x] = xH, \forall [x] \in G/H$, allora si ha che:

$$xh, xk \in xH \iff xh \neq xk \iff h \neq k$$

- Di conseguenza, la funzione di proiezione al quoziente $\rho : H \rightarrow xH : h \mapsto xh$ è sia suriettiva (per definizione stessa di xH), sia iniettiva (poiché $h \neq k \implies \varphi(h) \neq \varphi(k)$).
- Poiché φ è biettiva, ogni elemento di H viene mandato in un elemento di xH , implicando quindi che:

$$|H| = |xH| = |[x]|, \forall [x] \in G/H$$

4.1.2 Teorema di Lagrange

Theorem 6. Teorema di Lagrange

Sia G un **gruppo finito** e sia $H \subseteq G$ sottogruppo (dunque anche H finito). In tal caso, si ha che:

$$|G| = |H| \cdot |G/H|$$

Dimostrazione:

- Poiché le classi laterali sinistre di G in H sono classi di equivalenza, possiamo partizionare G in $|G/H|$ partizioni:

$$G = \coprod_{[x] \in G/H} [x]$$

- Siccome $|[x]| = |H|, \forall [x] \in G/H$, allora la cardinalità di G corrisponde a:

$$|G| = |H| \cdot |G/H|$$

4.2 L'anello commutativo \mathbb{Z}_n

Proposition 7. Gruppo quoziente G/H

Sia $(G, +)$ un **gruppo abeliano** e sia $H \subseteq G$ **sottogruppo**. In tal caso, anche l'insieme quoziente $(G/H, +)$ è un **gruppo abeliano**.

Dimostrazione:

- Dimostriamo prima che l'operazione somma intesa come $[x] + [y] = [x + y]$ sia ben definita, ossia che $[x] = [x'], [y] = [y'] \implies [x + y] = [x' + y']$:

$$\begin{aligned} [x] = [x'], [y] = [y'] &\implies x \sim x', y \sim y' \implies x' - x, y' - y \in H \implies \\ &\implies (x' - x) + (y' - y) = (x' + y') - (x + y) \in H \implies x + y \sim x' + y' \implies [x + y] = [x' + y'] \end{aligned}$$

- Verifichiamo quindi gli assiomi di gruppo abeliano:

- **Associatività:**

$$([x] + [y]) + [z] = [x + y] + [z] = [x + y + z] = [x] + [y + z] = [x] + ([y] + [z])$$

- **Elemento neutro:**

$$[x] + [0] = [x + 0] = [x]$$

- **Elemento inverso:**

$$[x] + [-x] = [x + (-x)] = [0]$$

- **Commutatività:**

$$[x] + [y] = [x + y] = [y + x] = [y] + [x]$$

Corollary 1

L'insieme quoziente \mathbb{Z}_n è un gruppo abeliano nella somma

Esempi:

Operando nel gruppo \mathbb{Z}_{11} si avrà che:

- $[9] + [8] = [17] = [6]$, poiché $17 \equiv 6 \pmod{11}$
- $[4] + [3] = [7]$
- $[5] - [6] = [-1] = [10]$, poiché $-1 \equiv 10 \pmod{11}$

Proposition 8. Anello quoziente A/I

Sia $(A, +, \cdot)$ un **anello commutativo** e sia $I \subseteq A$ **ideale**. In tal caso, anche $(A/I, +, \cdot)$ è un **anello commutativo**.

Dimostrazione:

- Abbiamo già visto che $(A/I, +)$ è gruppo abeliano e che $+: A/I \times A/I \rightarrow A/I$ è ben definita
- Verifichiamo quindi che $\cdot: A/I \times A/I \rightarrow A/I$ sia ben definita, dunque che valga:
 - $x \equiv x' \pmod{I} \implies i_1 := x' - x \in I$
 - $y \equiv y' \pmod{I} \implies i_2 := y' - y \in I$
 - $xy \equiv x'y' \pmod{I} \implies x'y' - xy \in I$

$$x'y' - xy = x'y' + xy' - xy' - xy = (x' - x)y' + x(y' - y) = i_1y' + xi_2$$

Siccome $i_1y', xi_2 \in I$ ne segue che $x'y' - xy = i_1y' + xi_2 \in I$, l'operazione prodotto è ben definita.

- Ammette l'assioma di associatività nel prodotto:

$$([x][y])[z] = [xy][z] = [xyz] = [x][yz] = [x]([y][z])$$

- Ammette l'assioma di elemento neutro nel prodotto:

$$[x][1] = [x \cdot 1] = [x]$$

- Ammette l'assioma di commutatività nel prodotto:

$$[x][y] = [xy] = [yx] = [y][x]$$

Corollary 2

L'insieme quoziente \mathbb{Z}_n è un anello commutativo nella somma con il prodotto

Esempi:

Operando nell'anello \mathbb{Z}_4 avremo che:

- $[2][3] = [6] = [2]$, poiché $6 \equiv 2 \pmod{4}$
- $[2][3]^{-1} = [2][3] = [4]$, poiché $[3]$ è l'inverso di $[3]$ in \mathbb{Z}_4 ($[3][3] = [9] = [1]$)

4.3 Invertibili e Divisori dello zero

Definition 28. Elementi invertibili

Dato un anello commutativo $(A, +, \cdot)$ e dato un elemento $a \in A$, affermiamo che a è **invertibile** se e solo se $\exists a^{-1} \in A \mid aa^{-1} = a^{-1}a = 1$.

Denotiamo come A^* l'insieme degli invertibili di A .

$$A^* : \{a \in A \mid a^{-1} \in A\}$$

Definition 29. Divisori dello zero

Dato un anello commutativo $(A, +, \cdot)$ e dato un elemento $a \in A$, affermiamo che a un **divisore dello zero** se e solo se $a \mid 0 \iff 0 = ab, \exists b \in A$.

Affermiamo che A è un **dominio di integrità** se l'unico elemento divisore dello zero è lo zero stesso ($\nexists a \neq 0 \in A$ tale che $a \mid 0$)

Observation 11

Un elemento è **invertibile** se e solo se **non è un divisore dello zero** (dunque può essere un divisore dello zero se e solo se non è un invertibile)

Dimostrazione per assurdo:

- Supponiamo che $\exists a, b \in A^*, b \neq 0 \mid ab = 0$. Allora, abbiamo che:

$$b = 1 \cdot b = (aa^{-1})b = a^{-1}(ab) = a^{-1} \cdot 0 = 0 \implies b = 0$$

contraddicendo quindi l'ipotesi iniziale, ossia $b \neq 0$

Observation 12

A può essere un dominio di integrità se e solo se vale la **legge di annullamento del prodotto**, ossia $xy = 0 \iff x = 0 \vee y = 0$

Observation 13

(A^*, \cdot) è un gruppo, poiché:

- L'elemento neutro 1 è invertibile, infatti $1^{-1} = 1 \implies 1 \in A^*$
- $x, y \in A^* \implies (xy)^{-1} = y^{-1}x^{-1} \implies xy \in A^*$
- $x \in A^* \implies x = (x^{-1})^{-1} \in A^* \implies x^{-1} \in A^*$

Observation 14

Se A è un **campo**, allora esso è **sempre un dominio di integrità**, poiché in tal caso si ha $A - A^* = \{0\}$, poiché ogni elemento di un campo è invertibile, dunque 0 è l'unico divisore dello zero esistente.

Proposition 9

Sia A un dominio di integrità. Dati $a, b \in A$, si verifica che:

$$I(a) = I(b) \iff a = bc, \exists c \in A^*$$

Dimostrazione:

- $a = bc, \exists c \in A^* \implies I(a) = I(b)$

$$a = bc, \exists c \in A^* \implies ac^{-1} = b \implies \begin{cases} a = bc \implies a \in I(b) \implies I(a) \subseteq I(b) \\ b = ac^{-1} \implies b \in I(a) \implies I(b) \subseteq I(a) \end{cases}$$

- $I(a) = I(b) \implies a = bc, \exists c \in A^*$

$$I(a) = I(b) \implies \begin{cases} a \in I(a) = I(b) \implies a = bc, \exists c \in A \\ b \in I(b) = I(a) \implies b = ad, \exists d \in A \end{cases}$$

Dunque si verifica che:

$$\begin{aligned} a = bc = adc &\implies a = adc \implies a(1 - dc) = 0 \implies \\ \implies \begin{cases} a = 0 \implies b = ad = 0 \implies a = bc = 0 \\ 1 - dc = 0 \implies dc = 1 \implies c = d^{-1} \implies c \in A^* \end{cases} \end{aligned}$$

Corollary 3

Nell'anello commutativo \mathbb{Z} , si verifica che:

$$I(a) = I(b) \iff a = \pm b$$

Dimostrazione:

- $a = \pm b \implies I(a) = I(b)$:

$$x \in I(a) \implies \exists y \in \mathbb{Z} \mid x = ay \implies -x = -(ay) = (-a)y \in I(-a)$$

- $I(a) = I(b) \implies a = \pm b$:

$$\begin{aligned} I(a) = I(b) &\implies a \in I(b), b \in I(a) \implies p, q \in \mathbb{Z} \mid a = bp, b = qa \implies \\ &\implies a = (qa)a \implies pq = 1 \implies p = q = \pm 1 \end{aligned}$$

Quindi gli unici due casi possibili sono:

$$p = q = 1 \implies a = b$$

$$p = q = -1 \implies a = -b$$

4.3.1 Irriducibili e Primi**Definition 30. Irriducibili e Primi**

Dato un anello commutativo A e un elemento $a \in A$.

- L'elemento a viene detto **irriducibile** se:

- $a \neq 0 \wedge a \notin A^*$
- $a = bc \implies b \in A^* \vee c \in A^*$

- L'elemento a viene detto **primo** se:

- $a \neq 0 \wedge a \notin A^*$
- $a \mid bc \implies a \mid b \vee a \mid c$

Proposition 10

Se A è un dominio di integrità e $a \in A$ è **primo**, allora esso è **anche irriducibile** (non è detto il contrario)

$$a \in A \mid a \text{ primo} \implies a \text{ irriducibile}$$

Dimostrazione:

- Supponiamo che $a \in A$ sia primo. La prima condizione è condivisa da entrambe le definizioni, quindi è automaticamente verificata.
- Supponiamo che $a = bc$. In tal caso, si ha che $a \mid a \implies a \mid bc \implies a \mid b \vee a \mid c$
- A questo punto, si ha che:

$$a \mid b \implies b = ad, \exists d \in A \implies a = bc = abd \implies a = adc \implies a(1 - cd) = 0$$

- Siccome $a \neq 0$, allora:

$$a(1 - cd) = 0 \implies 1 - cd = 0 \implies cd = 1 \implies c = d^{-1} \implies c \in A^*$$

- Analogamente, dimostriamo che $a \mid c \implies b \in A^*$
- Dunque, concludiamo che se a è primo allora esso è anche irriducibile:

$$a \text{ primo} \mid a = bc \implies a \mid b \vee a \mid c \implies b \in A^* \vee c \in A^*$$

Observation 15

\mathbb{Z}_n è un dominio di integrità se e solo se n è un numero primo.

In tal caso, usiamo la notazione \mathbb{Z}_p per dire che si tratta dell'anello quoziente di un numero primo.

Dimostrazione:

- \mathbb{Z}_n dominio $\implies n$ primo
 - Supponiamo che n non sia primo, ossia che possa essere espresso come il prodotto di due fattori ab tali che $a \notin A^* \wedge b \notin A^*$:

$$n = ab, 0 < a, b < n \implies [n] = [ab] = [a][b]$$

- Tuttavia, in \mathbb{Z}_n abbiamo che $[n] = [0]$, implicando che $[n] = [ab] = [0]$.
- Per la legge di annullamento del prodotto, $[a][b] = [0] \implies [a] = [0] \vee [b] = [0]$, contraddicendo l'ipotesi $a, b > 0$
- Di conseguenza, si ha che $a \mid 0$ e $b \mid 0$, dunque \mathbb{Z}_n non può essere un dominio di integrità.

4.4 Massimo comun divisore

Definition 31. Massimo comun divisore (MCD)

Sia I un ideale di \mathbb{Z} , allora esiste un $\exists! d \geq 0$ tale che $I = I(d)$ dove $I(d) : \{ad \mid a \in \mathbb{Z}\}$. Il generatore d di tale ideale principale viene definito come **massimo comun divisore**

$$d := MCD(a_1, \dots, a_n)$$

In altre parole, si ha che:

$$\exists x_1, \dots, x_n \in \mathbb{Z} \mid a_1x_1 + \dots + a_nx_n = d$$

che definiamo come **identità di Bezout**.

Dimostrazione:

- Se $I : \{0\}$, allora $I = I(0)$. Nel caso contrario, si avrebbe che $I \cap \mathbb{Z}_{>0} \neq \emptyset$, infatti $\exists 0 \neq n \in I$ tale che:
 - $n > 0 \implies n \in I$
 - $n < 0 \implies -n > 0 \implies -n \in I$
- Poniamo allora $d := \min(I \cap \mathbb{Z}_{>0})$ e mostriamo che $I = I(d)$:
 - $I(d) \subseteq I$:
 - * $x \in I(d) \implies \exists y \in \mathbb{Z} \mid x = yd$
 - * Per l'assioma degli ideali $IA \subseteq I$, ne segue che $d \in I$
 - $I \subseteq I(d)$:
 - * $x \in I$
 - * La divisione con resto di x per d , dove $d \neq 0$, equivale a :

$$\exists! q \in \mathbb{Z}, 0 \leq r < d \mid x = dq + r$$
 - * Assumiamo per assurdo che $r \neq 0$. Allora abbiamo che:

$$r \in I \cap \mathbb{Z}_{>0} \wedge r < d$$
 dunque contraddicendo la definizione $d := \min(I \cap \mathbb{Z}_{>0})$
 - * Dunque l'unica possibilità che $r = 0$:

$$x = dq + r \implies r = x - dq \implies x \in I, dq \in I(d)$$
 - * A questo punto, seguiamo la dimostrazione del punto precedente per verificare che $dq \in I(d) \implies dq \in I$
- Affermiamo quindi che dati $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{Z}$, il loro $d := MCD(a_1, \dots, a_n)$ è l'**unico intero** $d \geq 0 \mid I(d) = I(a_1, \dots, a_n)$.

Observation 16

Tale definizione di MCD coincide con la "classica" matematica, poiché:

$$d \mid x, \forall x \in I(d) = I(a_1, \dots, a_n)$$

Dimostrazione:

- Verifichiamo che $\forall k \in \mathbb{Z}$ tali che $\forall i \in [1, n], k \mid a_i \implies \exists x_i \in \mathbb{Z}, a_i = kx_i$ si ha che $k \mid d$, ossia ogni divisore in comune di a_1, \dots, a_n divide anche $d := MCD(a_1, \dots, a_n)$:

$$\begin{aligned} d \in I(a_1, \dots, a_n) &\implies \exists b_1, \dots, b_n \mid \underbrace{d = a_1 b_1 + \dots + a_n b_n}_{\text{Identità di Bezout}} \implies \\ &\implies d = (kx_1)b_1 + \dots + (kx_n)b_n = k(xb_1 + \dots + xb_n) \implies k \mid d \end{aligned}$$

Definition 32. Dominio ad ideali principali

Un dominio di integrità in cui **ogni ideale** I è **principale**, ossia esiste sempre un ideale principale $I(x) \mid I = I(x)$, viene detto **dominio ad ideali principali**.

Corollary 4

\mathbb{Z} è un **dominio ad ideali principali**, poiché $I = I(d)$ dove $d := MCD(a_1, \dots, a_n)$

Proposition 11

Dato l'anello $(\mathbb{Z}_n, +, \cdot)$ e dato $0 < a < n$ abbiamo che:

$$[a] \in \mathbb{Z}_n^* \iff MCD(a, n) = 1$$

Dimostrazione:

- Verifichiamo che $[a] \in \mathbb{Z}_n^* \implies MCD(a, n) = 1$. Supponendo che $[a] \in \mathbb{Z}_n^*$ abbiamo che:

$$\exists 0 < b < n \mid [a][b] = 1 \iff ab \equiv 1 \pmod{n} \iff \exists k \in \mathbb{Z} \implies 1 = ab + nk$$

Sia $d := MCD(a, n) > 0$. Dunque abbiamo che:

$$1 = ab + nk \in I(a, n) = I(d) \implies 1 \in I(d) \implies \exists p \in \mathbb{Z} \mid 1 = dp \implies d = p = \pm 1$$

Poiché $d > 0$, il caso con $d = p = -1$ viene escluso, dunque l'unico caso possibile è $d = p = 1$

- Verifichiamo che $MCD(a, n) = 1 \implies [a] \in \mathbb{Z}_n^*$

Supponendo che $MCD(a, n) = 1$ abbiamo che:

$$I(d) = I(a, n) \implies d \in I(a, n) \implies \exists b, k, d = ab + nk$$

Considerando le classi di congruenza modulo n , dove quindi $[n] = [0]$, otteniamo:

$$[1] = [ab + nk] = [a][b] + [n][k] = [a][b] \implies [b] = [a]^{-1} \implies [a] \in \mathbb{Z}_n^*$$

Corollary 5

Dato p un numero primo, \mathbb{Z}_p è un **campo** poiché

$$MCD(a, p) = 1, \forall 0 < a < p \implies \mathbb{Z}_p^* = \mathbb{Z}_p - \{0\}$$

Corollary 6

Dato un **campo** K e dato $a \in K, a \neq 0$, l'equazione $ax = b$ ammette sempre la **soluzione** $x = ba^{-1}$, poiché esiste sempre un inverso di a .

Esempio:

- Nel campo \mathbb{Z}_7 risolviamo l'equazione $[3]x + [2] = [0]$:

$$\begin{aligned} [3]x + [2] &= [0] \implies [3]x = -[2] \implies [3]x = [5] \implies \\ \implies x &= [5][3]^{-1} \implies x = [5][5] \implies x = [25] \implies x = [4] \end{aligned}$$

Poiché in \mathbb{Z}_7 l'inverso nel prodotto $[3]^{-1}$ corrisponde a $[5]$ ($[3][5] = [15] = [1]$)

Theorem 12

Data la seguente equazione:

$$ax \equiv b \pmod{n}$$

Sia $d := MCD(a, n)$. Si verifica che:

- Se $d \nmid b$, allora l'equazione non ammette soluzioni ($\nexists x \in \mathbb{Z}_n \mid ax \equiv b \pmod{n}$)
- Se invece $d \mid b$, allora posti $p := \frac{a}{d}, q := \frac{b}{d}, m := \frac{n}{d}$, l'equazione originale è equivalente a:

$$px \equiv q \pmod{m}$$

Dimostrazione:

- Se l'equazione ammette una soluzione $x \in \mathbb{Z}$, allora $ax = b + nk, \exists k \in \mathbb{Z}$.
- Poiché $d \mid a$ e $d \mid n$ (dato che $d := MCD(a, n)$), allora si ha che $d \mid b = ax - nk$. Viceversa, ciò dimostra che se $d \nmid b$, allora tale equazione non potrebbe ammettere soluzioni.
- Supponiamo quindi che $d \mid b$ e poniamo $p := \frac{a}{d}, q := \frac{b}{d}, m := \frac{n}{d}$ (implicando quindi che $a = pd, b = qd, n = md$). Dunque si verifica che:

$$\begin{aligned} ax \equiv b \pmod{n} &\iff pdx \equiv qd \pmod{md} \iff \\ \iff dp x &= dq + dm k, \exists k \in \mathbb{Z} \iff px = q + mk \iff px \equiv q \pmod{m} \end{aligned}$$

4.4.1 Algoritmo di Euclide

Siano $a, b \in \mathbb{Z}$ e sia $d := MCD(a, b)$. Poiché $I(a, b) = I(-a, b) = I(a, -b) = I(-a, -b)$, possiamo supporre che $0 < a, b$. Inoltre, poiché $I(a, b) = I(b, a)$, $MCD(0, b) = b$ e $MCD(a, 0) = 0$, supponiamo che $0 < a \leq b$.

Definiamo quindi **due metodi** per poter calcolare il massimo comun divisore tra due numeri, uno standard ed uno algoritmico:

Method 1. Fattorizzazione standard

- Scomponiamo a e b in **fattori primi**
- La composizione in fattori primi di d equivale ai **fattori in comune col grado minimo tra le due scomposizioni** di a e b

Esempio:

$$MCD(448, 216) = MCD(2^6 \cdot 7, 2^3 \cdot 3^3) = 2^3 = 8$$

Method 2. Algoritmo di Euclide

1. Assumiamo $0 < a \leq b$
2. Poniamo $r_0 := b$ e $r_1 := a$
3. Definiamo **ad ogni iterazione** $r_{i+1} := r_{i-1} \pmod{r_i}$, da cui ne segue che:
$$r_{i-1} = r_i q_i + r_{i+1}$$
4. Viene ripetuto il punto 3 finché $r_{i+1} \neq 0$
5. All' n -esima iterazione, ossia quando $r_{i+1} = 0$, si ha che $MCD(a, b) = r_n$

Dimostrazione:

Vogliamo verificare che $r_n = d := MCD(a, b)$, ossia che $r_n \mid d$ e $d \mid r_n$.

- Verifichiamo che $d \mid r_n$:

$$d := MCD(a, b) \iff d \mid r_1 \wedge d \mid r_0 \text{ dove } r_1 := a \in I(a, b), r_0 := b \in I(a, b)$$

Siccome $r_i \in I(a, b), \forall 0 \leq i \leq n$, otteniamo che:

$$r_{i+1} = r_{i-1} - r_i q_i \implies r_{i+1} \in I(a, b) \implies d \mid r_{i+1}$$

Di conseguenza, abbiamo che $d \mid r_n$

- Verifichiamo che $r_n \mid d$:

$$r_n \mid r_i, \forall 0 \leq i \leq n \implies i = n, r_n \mid r_n \wedge r_{n-1} = r_n q_n + 0 \implies r_n \mid r_{n-1}$$

Siccome $r_n \mid x, r_n \mid y \implies r_n \mid (cx + dy), \forall c, d \in \mathbb{Z}$, allora:

$$r_n \mid r_n \wedge r_n \mid r_{n-1} \implies r_n \mid r_{n-2}$$

$$r_n \mid r_{n-1} \wedge r_n \mid r_{n-2} \implies r_n \mid r_{n-3}$$

...

$$r_n \mid r_1 \wedge r_n \mid r_0 \implies r_n \mid d$$

dove $d := MCD(a, b)$

Esempi:

- Vogliamo calcolare $MCD(448, 216)$. Poniamo quindi inizialmente $r_0 = 448$ e $r_1 = 216$. Applicando l'algoritmo abbiamo quindi che:

$$r_0 = r_1 \cdot q_1 + r_2$$

$$448 = 216 \cdot 2 + 16$$

$$216 = 16 \cdot 13 + 8$$

$$16 = 8 \cdot 2 + 0$$

Dunque, otteniamo che $MCD(448, 216) = 8$

- Vogliamo calcolare l'**identità di Bezout** per $b = 216$ e $a = 448$ ossia i due valori x e y tali che:

$$x, y \in \mathbb{Z} \mid MCD(488, 216) = 216x + 448y$$

Tramite l'**algoritmo di Euclide** utilizzato nell'esercizio precedente, sappiamo che $MCD(488, 216) = 8$. Poniamo quindi:

$$216x + 448y = 8$$

A questo punto, ripercorrendo al contrario i calcoli dell'algoritmo di Euclide, otteniamo che:

$$216x + 448y = 8$$

$$216x + 448y = 216 - 16 \cdot 13$$

$$216x + 448y = 216 - (448 - 216 \cdot 2) \cdot 13$$

$$216x + 448y = 216(1 + 13 \cdot 2) - 448 \cdot 13$$

$$216x + 448y = 216(27) + 448(-13)$$

Otteniamo quindi che $x = 27$ e $y = -13$

- Vogliamo calcolare l'identità di Bezout e MCD per $a = 1470$, $b = 8316$ e $c = 12600$:

$$MCD(a, b, c) = MCD(a, MCD(b, c)) = MCD(MCD(a, b), c)$$

$$- d := MCD(b, c) = MCD(8316, 12600)$$

$$12600 := 8316 \cdot 1 + 4284$$

$$8316 := 4284 \cdot 1 + 4032$$

$$4284 := 4032 \cdot 1 + 252$$

$$4032 := 252 \cdot 16 + 0$$

dunque $d = 252$

- L'identità di Bezout per $MCD(8316, 12600) = 252 = 8316x + 12600y$ corrisponde a:

$$8316x + 12600y = 252$$

$$8316x + 12600y = 4284 - 4032$$

$$8316x + 12600y = (12600 - 8316) - (8316 - 4284)$$

$$8316x + 12600y = (12600 - 8316) - (8316 - (12600 - 8316))$$

$$8316x + 12600y = 12600 - 8316 - 8316 + 12600 - 8316$$

$$8316x + 12600y = 12600(2) + 8316(-3)$$

dunque $x = -3, y = 2$

- $p := MCD(a, d) = MCD(1470, 252)$

$$1470 = 252 \cdot 5 + 210$$

$$252 = 210 \cdot 1 + 42$$

$$210 = 42 \cdot 5 + 0$$

dunque $p = 42$

- L'identità di Bezout per $MCD(1470, 252) = 42 = 1470x + 252y$ corrisponde a:

$$1470z + 252w = 42$$

$$1470z + 252w = 252 - 210$$

$$1470z + 252w = 252 - (1470 - 252 \cdot 5)$$

$$1470z + 252w = 1470(-1) + 252(6)$$

dunque $x = -1, y = 6$

- L'identità di Bezout per $MCD(1470, 8316, 12600) = 42 = 1470x + 8316y + 12600z$ corrisponde a:

$$1470x + 8316y + 12600z = 42$$

$$1470x + 8316y + 12600z = 1470(-1) + (12600(2) + 8316(-3))(6)$$

$$1470x + 8316y + 12600z = 1470(-1) + 12600(12) + 8316 \cdot (-18)$$

dunque $x = -1, y = 12, z = -18$

4.4.2 Approfondimento sull'Identità di Bezout

Grazie all'algoritmo di Euclide, possiamo trovare due **soluzioni particolari** all'equazione dell'**identità di Bezout**, ossia $ax + by = MCD(a, b)$, per poi trovare tutte le soluzioni in grado di risolvere l'equazione:

Proposition 13

Data l'equazione $ax + by = d$, dove $d := MCD(a, b)$, e date x_0 e y_0 due soluzioni particolari dell'equazione, tutte le soluzioni dell'equazione hanno la forma:

$$x = x_0 + \frac{m}{a}k, \forall k \in \mathbb{Z} \quad y = y_0 - \frac{m}{b}k, \forall k \in \mathbb{Z}$$

dove $m := mcm(a, b)$, ossia il minimo comune multiplo tra a e b

Dimostrazione:

Innanzitutto, verifichiamo che le soluzioni possibili siano effettivamente valide:

$$a(x_0 + \frac{m}{a}k) + b(y_0 - \frac{m}{b}k) = d$$

$$ax_0 + mk + by_0 - mk = d$$

$$ax_0 + by_0 = d$$

A questo punto, verifichiamo che tali soluzioni appaiano solo nella forma indicata:

$$\begin{aligned} \begin{cases} ax_0 + by_0 = d \\ ax_1 + by_1 = d \end{cases} &\implies (ax_1 + by_1) - (ax_0 + by_0) = d - d \implies \\ a(x_1 - x_0) + b(y_1 - y_0) &= 0 \implies a(x_1 - x_0) = -b(y_1 - y_0) \implies \\ &\implies a(x_1 - x_0) = b(y_0 - y_1) \end{aligned}$$

Poniamo $N := a(x_1 - x_0) = b(y_0 - y_1)$. Dunque abbiamo che $a \mid N$ e $b \mid N$, implicando che N sia un multiplo di $m := mcm(a, b)$. Dunque si ha che $\exists k \in \mathbb{Z} \mid N = mk$:

$$\begin{cases} a(x_1 - x_0) = N = mk \\ b(y_0 - y_1) = N = mk \end{cases} \implies \begin{cases} x_1 - x_0 = \frac{m}{a}k \\ y_0 - y_1 = \frac{m}{b}k \end{cases} \implies \begin{cases} x_1 = x_0 + \frac{m}{a}k \\ y_1 = y_0 - \frac{m}{b}k \end{cases}$$

4.4.3 Criteri di divisibilità

Sia $a \in \mathbb{Z}$ con la sua **rappresentazione decimale**:

$$a = a_k \cdot 10^k + \dots + a_0 \cdot 10^0 = \sum_{i=0}^k a_i \cdot 10^i \text{ dove } a_i \in \{0, \dots, 9\}$$

Osserviamo che:

- $10 \equiv 1(\text{mod } 3) \implies 10x \equiv x(\text{mod } 3)$
- $10 \equiv 1(\text{mod } 9) \implies 10x \equiv x(\text{mod } 9)$
- $10 \equiv -1(\text{mod } 11) \implies 10x \equiv -x(\text{mod } 11)$

Quindi:

- In \mathbb{Z}_3 si ha che

$$a = \sum_{i=0}^k a_i \cdot 10^i \equiv \left[\sum_{i=0}^k a_i \cdot (1)^i \right] (\text{mod } 3)$$

- In \mathbb{Z}_9 si ha che

$$a = \sum_{i=0}^k a_i \cdot 10^i \equiv \left[\sum_{i=0}^k a_i \cdot (1)^i \right] (\text{mod } 9)$$

- In \mathbb{Z}_{11} si ha che

$$a = \sum_{i=0}^k a_i \cdot 10^i \equiv \left[\sum_{i=0}^k a_i \cdot (-1)^i \right] (\text{mod } 11)$$

Osserviamo inoltre che se $x \equiv y(\text{mod } n)$ e $k \mid n$ allora si ha che

$$x \equiv y(\text{mod } n) \implies y - x \in I(n) \implies y - x = nq = (kp)q = k(pq) \in I(k) \implies x \equiv y(\text{mod } k)$$

Esempi:

- Vogliamo sapere se $3 \mid 129383716$. Siccome siamo in \mathbb{Z}_3 abbiamo che:

$$129383716 \equiv [6 + 1 + 7 + 3 + 8 + 3 + 9 + 2 + 1](\text{mod } 3) \implies 129383716 \equiv 40(\text{mod } 3)$$

Tuttavia, siccome $3 \nmid 40$, ne segue che $3 \nmid 129383716$

- Vogliamo sapere se $11 \mid 129383716$. Siccome siamo in \mathbb{Z}_{11} abbiamo che:

$$129383716 \equiv [6 - 1 + 7 - 3 + 8 - 3 + 9 - 2 + 1](\text{mod } 11) \implies 129383716 \equiv 22(\text{mod } 11)$$

Tuttavia, siccome $11 \mid 22$, ne segue che $11 \mid 129383716$

4.5 Minimo comune multiplo

Ricordando che \mathbb{Z} è un **dominio ad ideali principali** (sezione 4.4), dati due ideali $I = I(a)$ e $J = I(b)$, abbiamo che

- $I + J = I(a) + I(b) = I(a, b) = I(d)$ dove $d := MCD(a, b)$

Dimostrazione:

$$\begin{aligned} I + J = I(a) + I(b) &= \{i + j \mid i \in I(a), j \in I(b)\} = \{i + j \mid x, y \in \mathbb{Z}, ax = i, by = j\} = \\ &= \{ax + by \mid x, y \in \mathbb{Z}\} = I(a, b) = I(d) \end{aligned}$$

- $I \cdot J = I(a) \cdot I(b) = I(ab)$

Dimostrazione:

$$- I(a) \cdot I(b) \subseteq I(ab)$$

$$\begin{aligned} x \in I(a) \cdot I(b) &\implies x = (ax_1)(by_1) + (ax_2)(by_2) + \dots + (ax_n)(by_n) = \\ &= ab(x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_ny_n) \implies ab \mid x \implies x \in I(ab) \end{aligned}$$

$$- I(ab) \subseteq I(a) \cdot I(b)$$

$$x \in I(ab) \implies x = abk = a(bk) \mid a \in I(a), bk \in I(b) \implies x \in I(a) \cdot I(b)$$

- $I(a) \cap I(b) = I(m)$ dove $m := mcm(a, b)$, ossia il **minimo comune multiplo** tra a e b .

Definition 33. Minimo comune multiplo (mcm)

Dati $I(a_1), I(a_2), \dots, I(a_n)$, definiamo come $m := mcm(a_1, \dots, a_n)$ l'unico intero $m \geq 0$ per cui si ha:

$$I(m) = I(a_1) \cap I(a_2) \cap \dots \cap I(a_n)$$

Dunque, caratterizziamo m come il **più piccolo tra i multipli in comune tra** a_1, a_2, \dots, a_n , avente le proprietà:

$$\begin{cases} a_1 \mid m \wedge a_2 \mid m \wedge \dots \wedge a_n \mid m \\ a_1 \mid N \wedge a_2 \mid N \wedge \dots \wedge a_n \mid N \end{cases} \implies m \mid N, \forall N = a_1 \cdot \dots \cdot a_n$$

Dimostrazione:

- Abbiamo che:

$$m \in I(m) = I(a_1) \cap I(a_2) \cap \dots \cap I(a_n) \implies a_1 \mid m \wedge \dots \wedge a_n \mid m$$

- Inoltre, siccome N è multiplo di a_1, \dots, a_n :

$$a_1 \mid N \wedge \dots \wedge a_n \mid N \implies N \in I(a_1) \cap I(a_2) \cap \dots \cap I(a_n) = I(m) \implies m \mid N$$

4.5.1 Teorema fondamentale dell'aritmetica

Il calcolo del mcm tra due numeri a, b può essere ridotto al calcolo del MCD, tramite il teorema fondamentale dell'aritmetica:

Theorem 14. Teorema fondamentale dell'aritmetica

Dati due numeri a e b , si ha che:

$$\text{mcm}(a, b) \cdot \text{MCD}(a, b) = ab$$

Attenzione: vale solo se applicato tra due numeri, dunque non vale che $\text{mcm}(a_1, \dots, a_n) \cdot \text{MCD}(a_1, \dots, a_n) = a_1 \cdot \dots \cdot a_n$

Dimostrazione:

- Se $a = 0 \vee b = 0$, allora:

$$\text{mcm}(a, b) = 0 \implies \text{mcm}(a, b) \cdot \text{MCD}(a, b) = 0 \cdot \text{MCD}(a, b) = 0$$

- Siano quindi $a, b > 0$. Denotiamo l'insieme di tutti i numeri primi come:

$$\mathbb{P} = \{2, 3, 5, 7, 11, \dots\}$$

- Considerando $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, tale numero può essere scritto come una **fattorizzazione in primi**, ossia:

$$\exists! n_2, n_3, n_5, \dots, n_p, \dots \text{ dove } p \in \mathbb{P}, n_p \in \mathbb{N} \mid n = 2^{n_2} \cdot 3^{n_3} \cdot \dots \cdot p^{n_p} \cdot \dots = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{n_p}$$

$$\text{dove } p \nmid n \implies n_p = 0$$

- Riscriviamo quindi a e b come:

$$a = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{a_p} \quad b = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{b_p}$$

- Poniamo inoltre $d := \text{MCD}(a, b)$ e $m := \text{mcm}(a, b)$, che per loro definizione corrispondono a:

$$d = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{\min(a_p, b_p)} \quad m = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{\max(a_p, b_p)}$$

- A questo punto, osserviamo che **se uno è il minimo tra i due, l'altro sarà il massimo**:

$$\min(a_p, b_p) = a_p \iff \max(a_p, b_p) = b_p$$

- Quindi, il prodotto tra d e m corrisponde a:

$$dm = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{\min(a_p, b_p)} \cdot \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{\max(a_p, b_p)} = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{a_p + b_p} = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{a_p} \cdot \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{b_p} = ab$$

Corollary 7. Calcolo del mcm

Dati $m := mcm(a, b)$ e $d := MCD(a, b)$, per il teorema fondamentale dell'aritmetica ne segue che

$$m = \frac{ab}{d}$$

4.6 Teorema cinese dei resti

Prima di procedere col teorema riguardante tale sezione, è necessario considerare i seguenti due lemmi:

Lemma 15. Numeri coprimi ed mcm

Dati interi $a_1, \dots, a_n \geq 2$, se $MCD(a_i, a_j) = 1, \forall i \neq j$ (ossia sono tutti interi coprimi tra loro), allora $mcm(a_1, \dots, a_n) = a_1 \cdot \dots \cdot a_n$

Dimostrazione:

- Poiché a_1, \dots, a_n sono coprimi tra loro, si ha che

$$MCD(a_i, a_j) = 1, \forall i \neq j \implies \forall p \in \mathbb{P}, p \mid a_i \implies p \nmid a_j, \forall j \neq i$$

- Consideriamo anche la loro fattorizzazione in primi:

$$a_1 = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{a_{1,p}}, \quad a_2 = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{a_{2,p}}, \quad \dots, \quad a_n = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{a_{n,p}}$$

- Dati i due punti precedenti, si ha che:

$$a_{i,p} > 0 \implies a_{j,p} = 0, \forall j \neq i \implies \forall p \in \mathbb{P}, a_{1,p} + \dots + a_{n,p} = \max(a_{1,p}, \dots, a_{n,p})$$

- Ponendo $m := mcm(a_1, \dots, a_n)$, quindi, abbiamo che:

$$m = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{\max(a_{1,p}, \dots, a_{n,p})} = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{a_{1,p} + \dots + a_{n,p}} = \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{a_{1,p}} \cdot \dots \cdot \prod_{p \in \mathbb{P}} p^{a_{n,p}} = a_1 \cdot \dots \cdot a_n$$

Lemma 16. Funzione φ

Consideriamo la **notazione** $x \bmod q$, indicante la classe di congruenza $[x]$ modulo q , dove $q \in \mathbb{N}$.

Dati $a_1, \dots, a_n \geq 2$ e posto $m := mcm(a_1, \dots, a_n)$, la funzione

$$\varphi : \mathbb{Z}_m \rightarrow \mathbb{Z}_{a_1} \times \mathbb{Z}_{a_2} \times \dots \times \mathbb{Z}_{a_n} : x \bmod m \mapsto (x \bmod a_1, \dots, x \bmod a_n)$$

è ben definita ed iniettiva

Dimostrazione:

- Consideriamo il sistema:

$$\begin{cases} x \equiv x' \pmod{a_1} \\ x \equiv x' \pmod{a_2} \\ \vdots \\ x \equiv x' \pmod{a_n} \end{cases} \iff \begin{cases} x' - x \in I(a_1) \\ x' - x \in I(a_2) \\ \vdots \\ x' - x \in I(a_n) \end{cases} \iff x' - x \in I(a_1) \cap \dots \cap I(a_n)$$

- Poiché $I(a_1) \cap \dots \cap I(a_n) = I(m)$, allora:

$$x' - x \in I(a_1) \cap \dots \cap I(a_n) = I(m) \iff x \equiv x' \pmod{m}$$

Theorem 17. Teorema cinese dei resti

Dati $a_1, \dots, a_n \geq 2$ tali che $MCD(a_i, a_j) = 1, \forall i \neq j$ e dove $0 \leq b_i < a_i, 1 \leq i \leq n$, il sistema di congruenze

$$\begin{cases} x \equiv b_1 \pmod{a_1} \\ x \equiv b_2 \pmod{a_2} \\ \vdots \\ x \equiv b_n \pmod{a_n} \end{cases}$$

ammette un'unica soluzione $x \pmod{m}$ dove $m = a_1 \cdot \dots \cdot a_n$.

Dimostrazione:

- Sia φ la stessa funzione del primo lemma e sia $m := mcm(a_1, \dots, a_n) = a_1 \cdot \dots \cdot a_n$ per il secondo lemma.
- Ricordando che l'insieme quoziente in n è definito come $\mathbb{Z}_n : \{0, \dots, n-1\}$, la sua cardinalità è $|\mathbb{Z}_n| = n$, calcolando la cardinalità del codominio della funzione φ otteniamo che:

$$|\mathbb{Z}_{a_1} \times \dots \times \mathbb{Z}_{a_n}| = |\mathbb{Z}_{a_1}| \cdot \dots \cdot |\mathbb{Z}_{a_n}| = a_1 \cdot \dots \cdot a_n = m = |\mathbb{Z}_m|$$

- Osserviamo che se il dominio e il codominio di una funzione $f : X \rightarrow Y$ hanno la stessa cardinalità finita, ossia $|X| = |Y| < +\infty$, allora essa può essere iniettiva se e solo se è anche suriettiva.
- Dunque, essendo $|\mathbb{Z}_{a_1} \times \dots \times \mathbb{Z}_{a_n}| = |\mathbb{Z}_m|$ ed essendo φ una funzione iniettiva, allora essa deve essere obbligatoriamente anche suriettiva.
- Concludiamo quindi che $\exists x \pmod{m} \in \mathbb{Z}_m$, abbiamo che

$$\varphi(x \pmod{m}) = (b_1 \pmod{a_1}, \dots, b_n \pmod{a_n})$$

equivale a dire che x è l'unica soluzione del sistema.

Esempi:

1. • Cerchiamo una soluzione per il seguente sistema:

$$\begin{cases} x \equiv 2 \pmod{3} \\ x \equiv 3 \pmod{5} \\ x \equiv 2 \pmod{7} \end{cases}$$

- Utilizzando la definizione di divisione con resto euclidea, $x \equiv 2 \pmod{3}$ corrisponde ad affermare che $x = 2 + 3a, \forall a \in \mathbb{Z}$ (in modulo 3)
- Sostituendo $x = 2 + 3a$ dentro $x \equiv 3 \pmod{5}$, otteniamo che:

$$2 + 3a \equiv 3 \pmod{5}$$

- Applicando la definizione di relazione di congruenza, impostiamo l'equazione (dove le classi di congruenza sono descritte appartengono tutte a \mathbb{Z}_5):

$$[2 + 3a] = [3]$$

$$[2] + [3][a] = [3]$$

$$[3][a] = [3] - [2]$$

$$[a] = [1][3]^{-1}$$

$$[a] = [1][2]$$

$$[a] = [2]$$

- Applicando inversamente la definizione di relazione di congruenza, otteniamo quindi che $[a] = [2] \implies a \equiv 2 \pmod{5} \implies a = 2 + 5b, \forall b \in \mathbb{Z}$
- Sostituendo $x = 2 + 3(2 + 5b) = 8 + 15b$ dentro $x \equiv 2 \pmod{7}$, otteniamo che:

$$8 + 15b \equiv 2 \pmod{5}$$

- Seguiamo quindi i passaggi analoghi a prima, stavolta lavorando in \mathbb{Z}_7 :

$$[8 + 15b] = [2]$$

$$[8] + [15][b] = [2]$$

$$[15][b] = [2] - [8]$$

$$[1][b] = [2] - [1]$$

$$[b] = [1]$$

- Quindi abbiamo che $[b] = [1] \implies b \equiv 1 \pmod{7} \implies b = 1 + 7c, \forall c \in \mathbb{Z}$
- Infine, otteniamo che

$$x = 8 + 15(1 + 7c) = 23 + 105c, \forall c \in \mathbb{Z} \implies x \equiv 23 \pmod{105}$$

- Notiamo come $105 = mcm(3, 5, 7,)$, dunque $x \equiv 23(\text{mod } 105)$ è l'unica soluzione del sistema. Difatti, verifichiamo che:

$$\begin{cases} 23 \equiv 2(\text{mod } 3) \\ 23 \equiv 3(\text{mod } 5) \\ 23 \equiv 2(\text{mod } 7) \end{cases}$$

2. • Cerchiamo una soluzione per il seguente sistema:

$$\begin{cases} x \equiv 6(\text{mod } 15) \\ x \equiv 9(\text{mod } 20) \end{cases}$$

- Poiché 15 e 20 non sono fattori primi, scomponiamo le due congruenze utilizzando il **teorema cinese dei resti**, in particolare la funzione φ :

$$x \equiv 6(\text{mod } 15) \implies \begin{cases} x \equiv 0(\text{mod } 3) \\ x \equiv 1(\text{mod } 5) \end{cases}$$

$$x \equiv 9(\text{mod } 20) \implies \begin{cases} x \equiv 1(\text{mod } 4) \\ x \equiv 4(\text{mod } 5) \end{cases}$$

- Il nuovo sistema sarà quindi:

$$\begin{cases} x \equiv 6(\text{mod } 15) \\ x \equiv 9(\text{mod } 20) \end{cases} \implies \begin{cases} x \equiv 0(\text{mod } 3) \\ x \equiv 1(\text{mod } 5) \\ x \equiv 1(\text{mod } 4) \\ x \equiv 4(\text{mod } 5) \end{cases}$$

- Notiamo come la seconda e la quarta relazione di congruenza risultino in un'**incompatibilità del sistema**, poiché $1(\text{mod } 5) \not\equiv 4(\text{mod } 5)$, dunque **il sistema non può avere soluzioni**

3. • Cerchiamo una soluzione per il seguente sistema:

$$\begin{cases} x \equiv 6(\text{mod } 15) \\ x \equiv 11(\text{mod } 20) \\ x \equiv 15(\text{mod } 21) \end{cases}$$

- Scomponendo in fattori primi si ha che:

$$x \equiv 6(\text{mod } 15) \implies \begin{cases} x \equiv 0(\text{mod } 3) \\ x \equiv 1(\text{mod } 5) \end{cases}$$

$$x \equiv 11(\text{mod } 20) \implies \begin{cases} x \equiv 3(\text{mod } 4) \\ x \equiv 1(\text{mod } 5) \end{cases}$$

$$x \equiv 15(\text{mod } 21) \implies \begin{cases} x \equiv 0(\text{mod } 3) \\ x \equiv 1(\text{mod } 7) \end{cases}$$

- Il nuovo sistema sarà quindi:

$$\begin{cases} x \equiv 6(\text{mod } 15) \\ x \equiv 11(\text{mod } 20) \\ x \equiv 15(\text{mod } 21) \end{cases} \implies \begin{cases} x \equiv 0(\text{mod } 3) \\ x \equiv 1(\text{mod } 5) \\ x \equiv 3(\text{mod } 4) \\ x \equiv 1(\text{mod } 7) \end{cases}$$

- Abbiamo quindi che $x \equiv 0(\text{mod } 3) \implies x = 0 + 3a, \forall a \in \mathbb{Z}$. Sostituendo nella seconda congruenza, otteniamo che $3a \equiv 1(\text{mod } 5)$. Lavorando in \mathbb{Z}_5 quindi si ha che:

$$[3a] = [1]$$

$$[3][a] = [1]$$

$$[a] = [1][3]^{-1}$$

$$[a] = [2]$$

- Dunque $[a] = [2] \implies a \equiv 2(\text{mod } 5) \implies a = 2 + 5b, \forall b \in \mathbb{Z}$.
- Sostituendo nella terza congruenza otteniamo $x = 3(2 + 5b) = 6 + 15b \implies 6 + 15b \equiv 3(\text{mod } 4)$. Lavorando in \mathbb{Z}_4 quindi si ha che:

$$[6 + 15b] = [3]$$

$$[6] + [15][b] = [3]$$

$$[2] + [3][b] = [3]$$

$$[3][b] = [3] - [2]$$

$$[b] = [1][3]^{-1}$$

$$[b] = [3]$$

- Dunque $[b] = [3] \implies b \equiv 3(\text{mod } 4) \implies b = 3 + 4c, \forall c \in \mathbb{Z}$
- Sostituendo nella quarta congruenza otteniamo $x = 6 + 15(3 + 4c) = 51 + 60c \implies 51 + 60c \equiv 1(\text{mod } 7)$. Lavorando in \mathbb{Z}_7 quindi si ha che:

$$[51 + 60c] = [1]$$

$$[2] + [4][c] = [1]$$

$$[2] + [4][c] = [1]$$

$$[4][c] = [1] - [2]$$

$$[4][c] = [-1]$$

$$[c] = [6][4]^{-1}$$

$$[c] = [6][2]$$

$$[c] = [12]$$

$$[c] = [5]$$

- Dunque $[c] = [2] \implies c \equiv 5 \pmod{7} \implies c = 5 + 7d, \forall d \in \mathbb{Z}$.
- Infine, otteniamo che

$$x = 51 + 60(5 + 7d) = 351 + 420d \implies x \equiv 351 \pmod{420}$$

che risulta essere l'unica soluzione del sistema. Difatti verifichiamo che:

$$\begin{cases} 351 \equiv 6 \pmod{15} \\ 351 \equiv 11 \pmod{20} \\ 351 \equiv 15 \pmod{21} \end{cases} \implies \begin{cases} 351 \equiv 0 \pmod{3} \\ 351 \equiv 1 \pmod{5} \\ 351 \equiv 3 \pmod{4} \\ 351 \equiv 1 \pmod{7} \end{cases}$$

4. • Vogliamo calcolare le ultime due cifre di 37^{37} . Poniamo quindi $x := 37^{37}$ e calcoliamo la classe di equivalenza $x \pmod{100}$.
- Scomponiamo quindi $100 = 4 \cdot 25$ in modo da poter applicare il teorema cinese dei resti:

- Calcoliamo la classe di equivalenza di x in \mathbb{Z}_4

$$[x] = [37^{37}] = [37]^{37} = [1]^{37} = [1]$$

- Calcoliamo la classe di equivalenza di x in \mathbb{Z}_{25}

$$\begin{aligned} [x] &= [37^{37}] = [37]^{37} = [12]^{37} = [12][12]^{36} = [12][(12)^2]^{18} = [12][144]^{18} = \\ &= [12][19]^{18} = [12][-6]^{18} = [12][(-6)^2]^9 = [12][36]^9 = [12][11]^9 = \\ &= [12][11][(11)^2]^4 = [12][11][121]^4 = [12][11][-4]^4 = [12][11][6] = [792] = [17] \end{aligned}$$

- Impostiamo quindi il seguente sistema e procediamo applicando il teorema cinese:

$$\begin{cases} x \equiv 1 \pmod{4} \\ x \equiv 17 \pmod{25} \end{cases}$$

- Abbiamo quindi che $x = 1 + 4k \implies 1 + 4k \equiv 17 \pmod{25}$:

$$[1] + [4][k] = [17]$$

$$[4][k] = [16]$$

$$[k] = [16][4]^{-1}$$

$$[k] = [16][19]$$

$$[k] = [304]$$

$$[k] = [4]$$

- Dunque $k \equiv 4 \pmod{25} \implies k = 4 + 25j \implies x = 1 + 4(4 + 25j) = 17 + 100j$
- Quindi concludiamo che $x \equiv 17 \pmod{100}$ e quindi che le ultime cifre di 37^{37} corrispondono a 17

5. • Vogliamo calcolare l'inverso di 193 in \mathbb{Z}_{240} . Per definizione, ciò equivale a calcolare $193x \equiv 1 \pmod{240}$

- Scomponiamo $240 = 24 \cdot 10$ e osserviamo che se $x \equiv y \pmod{n}$ e $d \mid n$ allora si ha che

$$x \equiv y \pmod{n} \implies y - x \in I(n) = y - x = n \cdot N = d(kN) \implies x \equiv y \pmod{d}$$

- Quindi, siccome $16 \mid 240, 3 \mid 240$ e $5 \mid 240$, impostiamo il seguente sistema

$$\begin{cases} 193x \equiv 1 \pmod{3} \\ 193x \equiv 1 \pmod{5} \\ 193x \equiv 1 \pmod{16} \end{cases}$$

- Riduciamo le classi di equivalenza del sistema:

- Riduciamo $193x \equiv 1 \pmod{3}$ in:

$$[193][x] = [1] \implies [1][x] = [1] \implies [x] = [1]$$

- Riduciamo $193x \equiv 1 \pmod{5}$ in:

$$[193][x] = [1] \implies [3][x] = [1] \implies [x] = [3]^{-1} \implies [x] = [2]$$

- Riduciamo $193x \equiv 1 \pmod{16}$ in:

$$[193][x] = [1] \implies [1][x] = [1] \implies [x] = [1]$$

- Riconduciamo quindi il sistema iniziale ad una versione semplificata sulla quale possiamo applicare il teorema cinese:

$$\begin{cases} 193x \equiv 1 \pmod{3} \\ 193x \equiv 1 \pmod{5} \\ 193x \equiv 1 \pmod{16} \end{cases} \implies \begin{cases} x \equiv 1 \pmod{3} \\ x \equiv 2 \pmod{5} \\ x \equiv 1 \pmod{16} \end{cases}$$

- Quindi si ha che $x = 1 + 16k \implies 1 + 16k \equiv 1 \pmod{3}$:

$$[1] + [16][k] = [1]$$

$$[k] = [0][16]^{-1}$$

$$[k] = [0]$$

- Dunque $k = 0 + 3j \implies x = 1 + 16(0 + 3j) = 1 + 48j \implies 1 + 48j \equiv 2 \pmod{5}$:

$$[1] + [48][j] = [2]$$

$$[j] = [1][3]^{-1}$$

$$[j] = [2]$$

- Infine $j = 2 + 5h \implies x = 1 + 48(2 + 5h) = 97 + 240h \implies x \equiv 97 \pmod{240}$
- Infatti in \mathbb{Z}_{240} si ha che $[193][97] = [1]$

4.7 Piccolo teorema di Fermat

Prima di enunciare e dimostrare il teorema, affermiamo il seguenti due lemmi:

Lemma 18

Dato $p \in \mathbb{P}$ e dato $0 < k < p$ si ha che:

$$p \mid \binom{p}{k}$$

Dimostrazione:

- Dato che per sua definizione stessa il calcolo del coefficiente binomiale corrisponde ad un numero intero (si consiglia di leggere [questa dimostrazione](#)), il numeratore e il denominatore si semplificano tra di loro, tuttavia senza mai semplificare p , poiché esso è primo e i valori al denominatore sono minori di esso.

Di conseguenza, si ha che:

$$\binom{p}{k} = n \cdot p, \exists n \in \mathbb{Z} \implies p \mid \binom{p}{k}$$

Esempio:

$$\binom{7}{3} = \frac{7!}{3! \cdot 4!} = \frac{7 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2}{3 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2} = 7 \cdot 5 \implies 7 \mid \binom{7}{3}$$

Da tale lemma, quindi, traiamo che in \mathbb{Z}_p si ha:

$$\binom{p}{k} \cdot [a] = 0$$

Inoltre, possiamo generalizzare tale casistica del caso in cui dato $n \in \mathbb{Z}$ dove $p \mid n$, in \mathbb{Z}_p si ha:

$$n \cdot [a] = 0$$

Difatti, dato $p \mid n$, poiché siamo in \mathbb{Z}_p si ha che:

$$n \cdot [a] = [na] = [pka] = [0]$$

Lemma 19

In \mathbb{Z}_p si ha che:

$$([a] + [b])^p = [a]^p + [b]^p$$

Dimostrazione:

- Dato il **binomio di Newton** (dimostrato nella sezione 3.6), sappiamo che:

$$([a] + [b])^p = \sum_{k=0}^p [a]^k [b]^{p-k}$$

- Se $k = 0$ o $k = p$, si ha che:

$$\binom{p}{0} = \binom{p}{p} = 1$$

- Se invece $0 < k < p$, per il lemma precedente sappiamo che in \mathbb{Z}_p :

$$p \mid \binom{p}{k} \implies \binom{p}{k} \cdot [a] = 0$$

- Di conseguenza, ogni termine della sommatoria, escluso il primo e l'ultimo, può essere ricondotto alla classe $[0]$:

$$\begin{aligned} ([a] + [b])^p &= \sum_{k=0}^p [a]^k [b]^{p-k} = \binom{p}{0} [b]^p + \binom{p}{1} [a] [b]^{p-1} + \dots + \binom{p}{p-1} [a]^{p-1} [b] + \binom{p}{p} [a]^p = \\ &= \binom{p}{0} [b]^p + [0] + \dots + [0] + \binom{p}{p} [a]^p = [b]^p + [a]^p \end{aligned}$$

Tale lemma, inoltre, può essere esteso a n fattori:

$$([a_1] + \dots + [a_n])^p = [a_1]^p + \dots + [a_n]^p$$

Dimostrazione:

- Caso base ($n=1$):

$$([a] + [b])^1 = [a] + [b] = [a]^1 + [b]^1$$

- Caso base ($n=2$): coincide con il lemma appena enunciato
- Passo induttivo:

$$\begin{aligned} ([a_1] + \dots + [a_n] + [a_{n+1}])^p &= ([a_1] + \dots + [a_n] + [a_{n+1}])^p = ([a_1] + \dots + [a_n])^p + [a_{n+1}]^p = \\ &= ([a_1] + \dots + [a_{n-1}])^p + [a_n]^p + [a_{n+1}]^p = \dots = [a_1]^p + \dots + [a_{n+1}]^p \end{aligned}$$

Theorem 20. Piccolo teorema di Fermat

In \mathbb{Z}_p si ha che $\forall p \in \mathbb{P}, \forall a \in \mathbb{Z}$ vale:

$$a^p \equiv a \pmod{p}$$

Dimostrazione:

- Caso base ($a=0$):

$$[0]^p = [0]$$

- Ipotesi induttiva:

$$[a]^p = [a]$$

- Passo induttivo:

$$[a+1]^p = ([a] + [1])^p = [a]^p + [1]^p = [a]^p + [1] = [a] + [1] = [a+1]$$

Tramite tale teorema, inoltre, possiamo dimostrare che:

$$[a]^p = [a]$$

$$[a]^k [a]^p = [a][a]^k$$

$$[a]^{p+k} = [a][a]^{k+1-1}$$

$$[a]^{p+k} = [a][a]^{-1}[a]^{k+1}$$

$$[a]^{p+k} = [1][a]^{k+1}$$

$$[a]^{p+k} = [a]^{k+1}$$

Ad esempio, abbiamo che $a^{p-2} \equiv a^{-1} \pmod{p}$ e che $5^7 \equiv 5^5 \equiv 5^3 \equiv 5 \equiv 2 \pmod{3}$.

4.8 Ordine di un elemento di un gruppo

Definition 34. Sottogruppo ciclico e ideale d'ordine

Sia G un gruppo e sia $g \in G$. Definiamo il sottogruppo $H(g) \subseteq G$ (detto **sottogruppo ciclico**) e l'ideale $I(g) \subseteq \mathbb{Z}$ come:

$$H(g) : \{g^n \mid n \in \mathbb{Z}\}$$

$$I(g) : \{n \in \mathbb{Z} \mid g^n = e\}$$

Dimostrazione:

- $(H(g), \cdot) \subseteq (G, \cdot)$

$$- g^0 = e \implies e \in H(g)$$

- $g^n, g^m \in H(g) \implies g^n \cdot g^m = g^{n+m} \implies g^{n+m} \in H(g)$
- $g^n \in H(g) \implies (g^n)^{-1} = g^{-n} \implies g^{-n} \in H(g)$
- $(I(g), +) \subseteq (\mathbb{Z}, +)$
 - $g^0 = e \implies 0 \in I(g)$
 - $n, m \in I(g) \implies g^n = g^m = e \implies g^{n+m} = g^n \cdot g^m = e \implies n + m \in I(g)$
 - $n \in I(g) \implies g^{-n} = (g^n)^{-1} = e^{-1} = e \implies -n \in I(g)$
 - $n \in I(g), k \in \mathbb{Z} \implies g^{nk} = (g^n)^k = e^k = e \implies kn \in I(g)$

Definition 35. Ordine di un elemento di un gruppo

Sia G un gruppo e sia $g \in G$. Dato $H(g) : \{g^n \mid n \in \mathbb{Z}\}$, definiamo l'ordine di g come:

$$o(g) := |H(g)|$$

Proposition 21

Dato $g \in G$ e dato l'ideale $I(g) : \{n \in \mathbb{Z} \mid g^n = e\}$, poiché \mathbb{Z} è un dominio a ideali principali, allora $\exists! d \geq 0 \mid I(g) = I(d)$ dove:

- $d = 0 \implies o(g) = \mathbb{Z} = "+\infty"$
- $d > 0 \implies o(g) = d$

dunque $o(g) = d := |H(g)|$ corrisponde al **più piccolo esponente** tale che $g^d = e$

Dimostrazione:

- Supponendo $I(g) = I(d)$, abbiamo che:

$$\begin{aligned} n, m \in I(g) &\implies g^n = g^m \implies g^{-n} \cdot g^n = g^m \cdot g^{-n} \implies e = g^{m-n} \implies \\ &\implies m - n \in I(g) = I(d) \implies d \mid m - n \end{aligned}$$

- Se $d = 0$, si ha:

- Siccome $d \mid m - n$, allora

$$0 \mid m - n \implies m - n = 0 \implies m = n$$

concludendo che $n \neq m \implies g^n \neq g^m$

- Di conseguenza, la funzione descrivente il sottogruppo $H(g)$

$$f : \mathbb{Z} \rightarrow H(g) : n \mapsto g^n$$

è biettiva, associando quindi ogni $n \in \mathbb{Z}$ ad un diverso $g^n \in H(g)$.

- Tuttavia, poiché $|\mathbb{Z}| = "+\infty"$, ne segue che anche $|H(g)| = "+\infty"$ affinché la funzione possa rimanere biettiva, implicando quindi che:

$$o(g) := |H(g)| = |\mathbb{Z}| = "+\infty"$$

- Se invece $d > 0$, si ha:

- Poiché $I(g) = I(d) \implies g^d = e$, esiste $n \in \mathbb{Z}$ divisibile con resto per d tale che:

$$n = qd + r, \exists q, r \in \mathbb{Z}, 0 \leq r < d \implies g^n = g^{qd+r} = (g^d)^q \cdot g^r = e^q \cdot g^r = g^r$$

poiché $0 \leq r < d$, concludiamo che $H(g)$ possa contenere al massimo d elementi, dunque $o(g) := |H(g)| \leq d$

- Mostriamo ora che presi $0 \leq m, n < d \implies -d < m - n < d$, si ha che

$$\begin{aligned} g^n = g^m &\implies g^{m-n} = e \implies g^{m-n} = (g^d)^k, \forall k \in \mathbb{Z} \implies \\ &\implies g^{m-n} = g^{dk} \implies m - n = dk \implies d \mid m - n \end{aligned}$$

- L'unico numero $-d < m - n < d$ tale che $m - n = dk, \exists k \in \mathbb{Z}$ è 0, di conseguenza $m - n = 0 \implies m = n$, implicando quindi che

$$H(g) : \{e = x^0 \mid x \in \{g^0, \dots, g^{d-1}\}\} = \{g^0, \dots, g^{d-1}\}$$

e di conseguenza che $o(g) := |H(g)| = d$

Proposition 22

Se G è un gruppo con cardinalità finita, allora per $g \in G$ si ha che

$$o(g) := |H(g)| \leq |G| < +\infty$$

Dunque, per il **teorema di Lagrange** si ha che:

$$o(g) \mid |G| \implies g^{|G|} = e$$

Attenzione: $o(g) \mid |G| \iff o(g) < +\infty$

Dimostrazione:

- Dato $o(g) = d := |H(g)|$, allora

$$o(g) \mid |G| \implies d \mid |G| \implies |G| = dk, \exists k \in \mathbb{Z} \implies g^{|G|} = g^{dk} = (g^d)^k = e^k = e$$

Inoltre, tramite tale proposizione possiamo trovare una **seconda dimostrazione del piccolo teorema di Fermat**:

2° *Dimostrazione del PTF*:

- Se $[a] = [0]$, allora abbiamo che $[a]^p = [0]$
- Se $[a] \neq [0]$, ricordiamo che \mathbb{Z}_p corrisponde ad un campo, dunque si ha che $\mathbb{Z}_p^* = \mathbb{Z}_p - \{0\}$, implicando che $|\mathbb{Z}_p^*| = p - 1$.
- Di conseguenza, per via della proposizione precedente, dato $[a] \in \mathbb{Z}_p^*$ si ha che:

$$[a]^{|\mathbb{Z}_p^*|} = [1] \implies [a]^{p-1} = [1] \implies [a]^p [a]^{-1} = [1] \implies [a]^p = [a]$$

Proposition 23. Gruppo ciclico

Dato un gruppo finito G e $g \in G$, siccome $H(g) \subseteq G$, allora

$$o(g) := |H(g)| = |G| < +\infty \iff G = H(g)$$

In tal caso definiamo G come **gruppo ciclico**

Observation 17

Dato un gruppo G e $g \in G$, se g è invertibile allora

$$g^{o(g)} = 1 \implies g^{o(g)} g^{-1} = g^{-1} \implies g^{o(g)-1} = g^{-1}$$

Lemma 24

Dato un gruppo G e $g \in G$ se g è invertibile allora

$$|H(g)| =: o(g) = o(g^{-1}) := |H(g^{-1})|$$

Dimostrazione:

- Basta osservare che $(g^{-1})^n = g^{-n}$ e $g^n = (g^{-1})^{-n}$ per ogni $n \in \mathbb{Z}$, dunque ogni potenza di g è anche una potenza di g^{-1} e viceversa
- Di conseguenza, si verifica che $H(g) = H^{-g}$, implicando quindi che $o(g) = o(g^{-1})$

Lemma 25

Dato G un gruppo finito e $k \in \mathbb{Z}$, per ogni $g \in G$ si verifica che:

$$o(g^k) \mid o(g)$$

Dimostrazione:

- Basta osservare che $(g^k)^n = g^{nk}$, dunque ogni potenza di g^k è anche una potenza di g . Di conseguenza, si verifica che $H(g^k) \subseteq H(g)$. Poiché H è un sottogruppo finito, allora per Lagrange abbiamo che $o(g^k) := |H(g^k)| \mid |H(g)| =: o(g)$

Lemma 26

Dato G un gruppo finito e $g, h \in G \mid gh = hg$, posti $m := \text{mcm}(o(g), o(h))$ e $d := \text{MCD}(o(g), o(h))$ si ha che

$$\frac{m}{d} \mid o(gh) \quad \text{e} \quad o(gh) \mid m$$

In particolare, se $d = 1$, allora $o(gh) = o(g)o(h)$

Dimostrazione:

- Siano $a := o(g)$ e $b := o(h)$. Per definizione stessa si ha che m è multiplo sia di a che di b , dunque $m = ap = bq, \exists p, q \in \mathbb{Z}$.
- Siccome per ipotesi abbiamo che $gh = hg$ e siccome $c := o(g)$ è il più esponente per cui $(gh)^c = e$, abbiamo che

$$(gh)^m = g^m h^m = g^{ap} h^{bq} = (g^a)^p (h^b)^q = e^p e^q = e \implies c := o(gh) \mid m$$

- Viceversa, abbiamo che

$$e = (gh)^c = g^c h^c \implies e = g^c h^c \implies k := g^c = h^{-c}$$

- Siccome per il lemma precedente $o(k) = o(g^c) \mid o(g)$ e $o(k) = o(h^{-c}) \mid o(h)$, allora $o(k) \mid d$, implicando che:

$$\frac{m}{d} \mid \left(\frac{m}{d} \cdot \frac{d}{o(k)} \right) = \frac{m}{o(k)}$$

- Inoltre, abbiamo che

$$g^{o(k)c} = (g^c)^{o(k)} = k^{o(k)} = e \implies a := o(g) \mid o(k)c$$

e analogamente che:

$$h^{-o(k)c} = (h^{-c})^{o(k)} = k^{o(k)} = e \implies b : o(h) \mid -o(k)c \implies b \mid o(k)c$$

di conseguenza si ha che $m \mid o(k)c$

- Quindi, $\exists j \in \mathbb{Z}$ tale che:

$$o(k)c = mj \implies c = \frac{m}{o(k)} \cdot j \implies \frac{m}{o(k)} \mid c := o(gh)$$

- Infine, per transitività si ha che:

$$\frac{m}{d} \mid \frac{m}{o(k)} \wedge \frac{m}{o(k)} \mid o(gh) \implies \frac{m}{d} \mid o(gh)$$

- Per l'ultima affermazione notiamo che se $d = 1$, allora per il teorema fondamentale dell'aritmetica si ha $m = o(g)o(h)$. Avendo già mostrato che:

$$\frac{m}{d} \mid o(gh)$$

e che

$$o(gh) \mid m$$

se $d = 1$ allora

$$m \mid o(gh) \wedge o(gh) \mid m \iff o(gh) = m = o(g)o(h)$$

Esempio:

- Vogliamo trovare tutti gli inversi di \mathbb{Z}_{21} e il loro ordine, determinando se \mathbb{Z}_{21} sia un gruppo ciclico
- Dato $g \in \mathbb{Z}_{21}$, sappiamo che $g \in \mathbb{Z}_{21}^* \iff MCD(a, 21) = 1$ (sezione 4.4). Dunque abbiamo che:

$$\mathbb{Z}_{21}^* : \{[1], [2], [4], [5], [8], [10], [11], [13], [16], [17], [19], [20]\} \implies |\mathbb{Z}_{21}^*| = 12$$

- Dato $g \in \mathbb{Z}_{21}^*$, per Lagrange abbiamo che $o(g)$ può essere solo un divisore di $|\mathbb{Z}_{21}^*|$, riducendo i tentativi necessari a trovare l'ordine di ogni elemento da 21 a 6:

$$o(g) \mid |\mathbb{Z}_{21}^*| \implies o(g) \mid 12 \implies o(g) = \begin{cases} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 6 \\ 12 \end{cases}$$

- Calcoliamo quindi gli ordini dei vari invertibili in \mathbb{Z}_{21} trovati:

$$- [1]^1 = 1 \implies \begin{cases} o([1]) = 1 \\ [1]^{-1} = [1]^0 = [1] \end{cases}$$

$$- [2]^6 = [64] = [1] \implies \begin{cases} o([2]) = 6 \\ [2]^{-1} = [2]^5 = [11] \end{cases} \implies \begin{cases} o([11]) = 6 \\ [11]^{-1} = [2] \end{cases}$$

$$- [4]^3 = [2]^6 = [64] = [1] \implies \begin{cases} o([4]) = 3 \\ [4]^{-1} = [4]^2 = [16] \end{cases} \implies \begin{cases} o([16]) = 3 \\ [16]^{-1} = [4] \end{cases}$$

$$- [5]^6 = [5^2]^3 = [4]^3 = [1] \implies \begin{cases} o([5]) = 6 \\ [5]^{-1} = [5]^5 = [17] \end{cases} \implies \begin{cases} o([17]) = 6 \\ [17]^{-1} = [5] \end{cases}$$

$$- [8]^2 = [2]^6 = [1] \implies \begin{cases} o([8]) = 2 \\ [8]^{-1} = [8] \end{cases}$$

$$- [10]^6 = [10^3]^2 = [13]^2 = [1] \implies \begin{cases} o([10]) = 6 \\ [10]^{-1} = [10]^5 = [19] \end{cases} \implies \begin{cases} o([19]) = 6 \\ [19]^{-1} = [10] \end{cases}$$

$$- [13]^2 = [1] \implies \begin{cases} o([13]) = 2 \\ [13]^{-1} = [13]^1 = [13] \end{cases}$$

$$- [20]^2 = [1] \implies \begin{cases} o([20]) = 2 \\ [20]^{-1} = [20]^1 = [20] \end{cases}$$

- Poiché $\nexists g \in G \mid o(g) = |G|$, concludiamo che \mathbb{Z}_{21}^* non è un gruppo ciclico

Proposition 27

Siano $n_1, \dots, n_k \neq 0 \in \mathbb{N}$ dove $MCD(a_i, a_j) \iff i \neq j$. Per il teorema fondamentale dell'aritmetica, si ha $N := mcm(n_1, \dots, n_k) = n_1 \cdot \dots \cdot n_k$.

Dato $[a] \in \mathbb{Z}_{>}^*$, sia o l'ordine di $[a]$ in nel gruppo $\mathbb{Z}_{>}^*$ e sia o_h l'ordine di $[a]$ nel gruppo $\mathbb{Z}_{\times \sim}^*$, $\forall 0 < h < k$.

In tal caso, si ha che:

$$o = m := mcm(o_1, \dots, o_k)$$

Dimostrazione:

- Per il teorema cinese dei resti, abbiamo che:

$$\begin{aligned} a^o \equiv 1(\text{mod } N) &\iff \begin{cases} a^o \equiv 1(\text{mod } n_1) \\ \vdots \\ a^o \equiv 1(\text{mod } n_k) \end{cases} \iff \\ &\iff \begin{cases} o_1 \mid o \\ \vdots \\ o_k \mid o \end{cases} \iff m := mcm(o_1, \dots, o_k) \mid o \end{aligned}$$

- Inoltre, poiché $m := mcm(o_1, \dots, o_k)$, abbiamo che:

$$\begin{cases} o_1 \mid m \\ \vdots \\ o_k \mid m \end{cases} \iff \begin{cases} a^m \equiv 1(\text{mod } n_1) \\ \vdots \\ a^m \equiv 1(\text{mod } n_k) \end{cases} \iff a^m \equiv 1(\text{mod } N) \implies o \mid m$$

- Siccome $o \mid m$ e $m \mid o$, l'unica possibilità è che $o = m$

Capitolo 5

Gruppo Simmetrico

Definition 36. Gruppo simmetrico

Dato un insieme X , denotiamo come \mathbb{S}_X l'insieme composto da tutte le funzioni biettive da X in se stesso.

$$\mathbb{S}_X : \{f : X \rightarrow X \mid f \text{ è biettiva}\}$$

Inoltre, si ha che (\mathbb{S}_X, \circ) è un gruppo.

Dimostrazione:

- $f, g, h \in \mathbb{S}_X \implies h \circ (g \circ f) = h \circ g \circ f = (h \circ g) \circ f$
- $\exists \text{id} : x \mapsto x \in \mathbb{S}_X \mid \forall f \in \mathbb{S}_X, f \circ \text{id} = \text{id} \circ f = f$
- $\exists f^{-1} : f(x) \mapsto x \in \mathbb{S}_X \mid f \circ f^{-1} = f^{-1} \circ f = \text{id}$

Observation 18

Una funzione f può essere invertibile se e solo se f è biettiva.

$$f \text{ è invertibile} \iff f \text{ è biettiva}$$

Dimostrazione:

- Se f è invertibile, allora:
 - f è suriettiva poiché $x = f(f^{-1}(x)), \forall x \in X$
 - f è iniettiva poiché $f(x) = f(y) \implies x = f^{-1}(f(x)) = f^{-1}(f(y)) = y$
- Se f è biettiva, allora $\forall x \in X, \exists! y \mid f(y) = x$
Ponendo $y = f^{-1}(x)$, il vincolo biettivo è rispettato e inoltre otteniamo che

$$\forall f \in \mathbb{S}_X, \exists f^{-1} \in \mathbb{S}_X \mid f \circ f^{-1} = f^{-1} \circ f$$

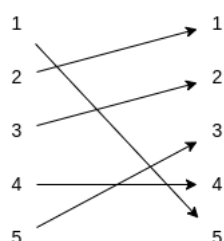
Il gruppo simmetrico presenta alcune **caratteristiche**:

- Trattandosi di funzioni biettive, ogni elemento del gruppo simmetrico corrisponde ad una **permutazione** del dominio X
- Se X è finito, ossia possiede un numero finito di elementi (dunque $|X| = n$), allora denotiamo il suo **gruppo simmetrico di ordine n** come \mathcal{S}_n
- Poiché **tutte le permutazioni possibili** di un insieme di n elementi corrispondono a $n!$, allora abbiamo che $|X| = n \implies |\mathcal{S}_n| = n!$

Data una **permutazione** $\sigma \in \mathcal{S}_n$, possiamo utilizzare due notazioni per poterne descrivere il comportamento:

Tramite grafo

σ



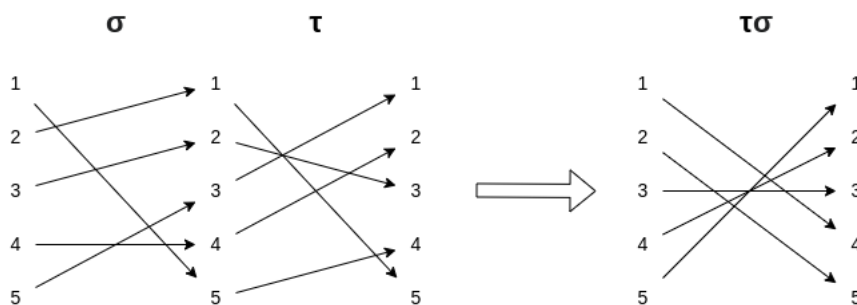
Tramite matrice

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 5 & 1 & 2 & 4 & 3 \end{pmatrix}$$

Definiamo l'operazione **prodotto tra due permutazioni** come la **composizione di due funzioni**, dunque $\tau\sigma = \tau(\sigma)$.

Quindi si ha che:

- Per effettuare il prodotto tramite rappresentazione con grafo, ci basta considerare l'**unione delle frecce** appartenenti ad ognuna delle permutazioni:



- Per effettuare il prodotto tramite rappresentazione con matrici, ci basta far "scorrere" gli elementi iniziali della seconda permutazione affinché coincidano con quelli finali della prima permutazione. Il risultato del prodotto sarà costituito dagli **elementi iniziali della prima** (o sia il fattore destro) e gli **elementi finali della seconda** (ossia il fattore sinistro):

$$\begin{array}{l} \sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 5 & 1 & 2 & 4 & 3 \end{pmatrix} \\ \tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 5 & 3 & 1 & 2 & 4 \end{pmatrix} \end{array} \implies \begin{array}{l} \sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 5 & 1 & 2 & 4 & 3 \end{pmatrix} \\ \tau = \begin{pmatrix} 5 & 1 & 2 & 4 & 3 \\ 4 & 5 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \implies \tau\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 4 & 5 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Observation 19

Poiché il prodotto è dato dalla composizione, tale operazione non è commutativa, dunque

$$\tau\sigma \neq \sigma\tau$$

5.1 Ordine di una permutazione

Un caso particolare di ordine di un elemento appartenente ad un gruppo è quello delle **permutazioni**.

Definition 37. Ciclo di una permutazione

Data $\sigma \in \mathcal{S}_n$, definiamo come **ciclo di σ** una sequenza di interi $1 \leq i_1, \dots, i_n \leq n$ tutti distinti tra loro tali che:

$$\sigma(i_1) = i_2, \sigma(i_2) = i_3, \dots, \sigma(i_n) = i_1$$

Definiamo come **lunghezza del ciclo** il numero di elementi appartenenti al ciclo.

Ad esempio, consideriamo la seguente permutazione in S_9 :

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 5 & 7 & 6 & 9 & 2 & 3 & 1 & 4 & 8 \end{pmatrix}$$

Notiamo la presenza di tre cicli all'interno di tale permutazione:

- $1 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 1$ che abbreviamo come (1587)
- $3 \rightarrow 6 \rightarrow 3$ che abbreviamo come (36)
- $4 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 4$ che abbreviamo come (498)

Nel nostro esempio, quindi, abbiamo tre cicli di lunghezza rispettiva 4, 2 e 3, i quali descrivono la permutazione stessa $\sigma = (1587)(36)(498)$

Definition 38. Decomposizione in cicli

Data $\sigma \in \mathcal{S}_n$ composta da k cicli, definiamo la sua **decomposizione in cicli** come:

$$\sigma = \gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_k$$

dove γ_i è un ciclo di σ

Notiamo, inoltre, la possibilità di **ricostruire una permutazione** qualsiasi tramite la sua decomposizione in cicli. Ad esempio, in S_8 si ha che:

$$\sigma = (235)(1874)(6) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 8 & 3 & 5 & 1 & 2 & 6 & 4 & 7 \end{pmatrix}$$

Definition 39

Data $\sigma \in \mathcal{S}_n$ e dato $1 \leq i \leq n$, definiamo i seguenti due ideali di $(\mathbb{Z}, +)$:

$$I(\sigma, i) : \{n \in \mathbb{Z} \mid \sigma^n(i) = i\}$$

$$I(\sigma) : \{n \in \mathbb{Z} \mid \sigma^n = \text{id}\}$$

dove **id** rappresenta la **permutazione identica**, ossia quella che manda ogni elemento in se stesso, corrispondente quindi all'elemento neutro in \mathcal{S}_n .

Dimostriamo quindi che si tratta di due ideali (la dimostrazione per il secondo ideale è analoga a quella del primo, dunque verrà omessa):

- $\sigma^0(i) = \text{id}(i) = i \implies 0 \in I(\sigma, i)$
- $m, n \in I(\sigma, i) \implies \sigma^m(i) = \sigma^n(i) = i \implies \sigma^{n+m}(i) = (\sigma^n)^m(i) = \sigma^m(i) = i \implies m+n \in I(\sigma, i)$
- $n \in I(\sigma, i) \implies \sigma^{-n}(i) = (\sigma^n)^{-1}(i) = i \implies -n \in I(\sigma, i)$
- $n \in I(\sigma, i) \implies \sigma^{nk}(i) = (\sigma^n)^k(i) = i, \forall k \in \mathbb{Z} \implies nk \in I(\sigma, i), \forall k \in \mathbb{Z}$

Per gli ultimi due punti è necessario osservare che data una permutazione $\sigma \in \mathcal{S}_n$ dove $\sigma(i) = i$, dunque i viene sempre mandato in se stesso, allora $\sigma^k(i) = i, \forall k \in \mathbb{Z}$.

Lemma 28

Se $i \leq i \leq n$ è un elemento appartenente ad un ciclo di σ di lunghezza d , poiché \mathbb{Z} è un dominio ad ideali principali si ha che $I(\sigma, i) = I(d)$

Dimostrazione:

- Ci basta verificare che se $d \in I(\sigma, i)$ e $0 < k < d$, allora $k \notin I(\sigma, i)$.
- Sia quindi $i \in (i_1 i_2 \dots i_d)$, ossia appartenente ad un ciclo di lunghezza d . Per comodità, supponiamo che $i = i_1$, poiché scorrere l'ordine degli elementi del ciclo non ne cambia le proprietà (ad esempio: $(2783) = (7832)$)
- Si verifica quindi che:

$$0 < k < d \implies \sigma^k(i) = \sigma(\sigma^{k-1}(i)) = \sigma(i_k) = i_{k+1}$$

- Nel caso in cui invece $k = d$, si verifica che:

$$k = d \implies \sigma^d(i) = \sigma(i_d) = i_1$$

- Di conseguenza, **la più piccola potenza di σ che manda i in se stesso è d** , dove d è la lunghezza del ciclo.

Lemma 29. Ordine di una permutazione

Data $\sigma \in \mathcal{S}_n$ e data la sua decomposizione in cicli $\sigma = \gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_k$, si verifica che

$$o(\sigma) = mcm(d_1, \dots, d_k)$$

dove d_i è la lunghezza del ciclo γ_i

Dimostrazione:

- Per definizione stessa dei due ideali $I(\sigma)$ e $I(\sigma, i)$, si ha che:

$$\begin{aligned} n \in I(\sigma) &\iff \sigma^n = \text{id} \iff \sigma^n(i) = i, \forall 1 \leq i \leq n \iff \\ &\iff n \in I(\sigma, i), \forall 1 \leq i \leq n \iff n \in I(\sigma, 1) \cap \dots \cap I(\sigma, n) \end{aligned}$$

- Di conseguenza, dato $d := o(\sigma)$ e $m := mcm(d_1, \dots, d_n)$, per via delle proprietà degli ideali si verifica che:

$$I(d) = I(\sigma) = I(\sigma, 1) \cap \dots \cap I(\sigma, n) = I(d_1) \cap \dots \cap I(d_n) = I(m)$$

Esempi:

- Data $\sigma \in S_7$ tale che:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 3 & 6 & 5 & 7 & 2 & 1 & 4 \end{pmatrix} = (13526)(47)$$

L'ordine di tale permutazione risulta essere:

$$o(\sigma) = mcm(5, 2) = 10$$

- Data $\sigma \in S_{15}$ tale che:

$$\sigma = (1\ 2\ 10\ 8\ 3)(11\ 7)(4\ 12\ 14\ 6)(13)(5\ 15\ 9)$$

L'ordine di tale permutazione risulta essere:

$$o(\sigma) = mcm(5, 2, 4, 1, 3) = 60$$

5.2 Segno delle permutazioni

Definition 40

Data $\sigma \in \mathcal{S}_n$, definiamo come **inversione di σ** una coppia di valori (i, j) dove $1 \leq i, j \leq n$ tale che $\sigma(i) > \sigma(j)$.

Denotiamo quindi l'insieme delle inversioni di σ come:

$$Inv(\sigma) : \{1 \leq i, j \leq n \mid \sigma(i) > \sigma(j)\}$$

Ad esempio, data la permutazione

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 5 & 3 & 1 & 4 \end{pmatrix}$$

l'insieme delle sue inversioni sarà:

$$Inv(\sigma) : \{(1, 4), (2, 3), (2, 4), (2, 5), (3, 4)\}$$

Definiamo quindi il **segno di** σ come:

Definition 41. Segno di una permutazione

Data $\sigma \in \mathcal{S}_n$ e dato l'insieme delle sue inversioni definito come

$$Inv(\sigma) : \{1 \leq i, j \leq n \mid \sigma(i) > \sigma(j)\}$$

il **segno della permutazione** σ corrisponde a:

$$sgn(\sigma) = (-1)^{|Inv(\sigma)|} = \begin{cases} +1 & \text{se } |Inv(\sigma)| \text{ è pari} \\ -1 & \text{se } |Inv(\sigma)| \text{ è dispari} \end{cases}$$

Affermiamo che σ è **pari** se il suo segno è $+1$, mentre è **dispari** se il suo segno è -1 .

Definition 42

Dati $1 \leq i < j \leq n$, definiamo come **trasposizione** un particolare tipo di permutazione $\tau_{i,j} \in \mathcal{S}_n$ tale che:

$$\tau_{i,j}(k) = \begin{cases} j & \text{se } k = i \\ i & \text{se } k = j \\ k & \text{se } k \neq i \wedge k \neq j \end{cases}$$

In particolare, definiamo come **trasposizione adiacente** una trasposizione in cui $j = i + 1$, dunque del tipo $\tau_{i,i+1}$, scambiando quindi due elementi adiacenti tra loro.

Lemma 30

Data una permutazione $\sigma \in \mathcal{S}_n$, essa può essere espressa come il **prodotto di k trasposizioni adiacenti**:

$$\exists 1 \leq i_1, \dots, i_k \mid \sigma = \tau_{i_1, i_1+1} \cdot \dots \cdot \tau_{i_k, i_k+1}$$

Dimostrazione tramite esempio:

- Osserviamo prima come dati $\sigma, \tau_{i,j} \in \mathcal{S}_n$, quindi definiti come:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & \dots & i & \dots & j & \dots & n \\ \sigma(1) & \dots & \sigma(i) & \dots & \sigma(j) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

$$\tau_{i,j} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & i & \dots & j & \dots & n \\ 1 & \dots & j & \dots & i & \dots & n \end{pmatrix}$$

si ha che:

$$\sigma\tau_{i,j} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & i & \dots & j & \dots & n \\ \sigma(1) & \dots & \sigma(j) & \dots & \sigma(i) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

- Ad esempio, quindi, Data $\sigma \in S_3$ definito come:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 4 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

abbiamo che:

$$\sigma \cdot \tau_{3,4} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 4 & 1 & 3 \end{pmatrix} \implies \sigma \cdot \tau_{3,4} \cdot \tau_{2,3} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 4 & 3 \end{pmatrix} \implies$$

$$\implies \sigma \cdot \tau_{3,4} \cdot \tau_{2,3} \cdot \tau_{1,2} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 4 & 3 \end{pmatrix} \implies \sigma \cdot \tau_{3,4} \cdot \tau_{2,3} \cdot \tau_{1,2} \cdot \tau_{3,4} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{pmatrix} = \text{id}$$

- Dunque, si ha che:

$$\begin{aligned} \sigma(\tau_{3,4}\tau_{2,3}\tau_{1,2}\tau_{3,4}) &= \text{id} \\ \sigma(\tau_{3,4}\tau_{2,3}\tau_{1,2}\tau_{3,4})(\tau_{3,4}\tau_{2,3}\tau_{1,2}\tau_{3,4})^{-1} &= \text{id}(\tau_{3,4}\tau_{2,3}\tau_{1,2}\tau_{3,4})^{-1} \\ \sigma &= (\tau_{3,4}\tau_{2,3}\tau_{1,2}\tau_{3,4})^{-1} \\ \sigma &= \tau_{3,4}\tau_{1,2}\tau_{2,3}\tau_{3,4} \end{aligned}$$

Proposition 31

Data $\sigma \in \mathcal{S}_n$ dove $\sigma = \tau_1 \cdot \dots \cdot \tau_k$ dove $\tau_i = \tau_{i,i+1} \in \mathcal{S}_n$ (ossia sono trasposizioni adiacenti), allora si ha che:

$$\text{sgn}(\sigma) = (-1)^k$$

dove k è il numero di trasposizioni adiacenti che compongono σ

Dimostrazione:

- Sia $\tau = \tau_{i,i+1}$. Allora si ha che:

$$\sigma\tau = \begin{pmatrix} 1 & \dots & i & i+1 & \dots & n \\ \sigma(1) & \dots & \sigma(i+1) & \sigma(i) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

- Lo scambio effettuato genera una di due situazioni: viene **creata una nuova inversione** oppure viene **risolta un'inversione pre-esistente**:

$$Inv(\sigma\tau) = \begin{cases} Inv(\sigma) \cup \{(i, i+1)\} & \text{se } (i, i+1) \notin Inv(\sigma) \\ Inv(\sigma) \setminus \{(i, i+1)\} & \text{se } (i, i+1) \in Inv(\sigma) \end{cases}$$

- Di conseguenza, si verifica che

$$|Inv(\sigma\tau)| = |Inv(\sigma)| \pm 1$$

dunque se $|Inv(\sigma)|$ è dispari allora $|Inv(\sigma\tau)|$ sarà pari, mentre se $|Inv(\sigma)|$ è pari allora $|Inv(\sigma\tau)|$ sarà dispari. Quindi, si verifica che:

$$sgn(\sigma\tau) = -sgn(\sigma)$$

- Data $\sigma = \tau_i \cdot \dots \cdot \tau_k$, si ha che:

$$\sigma(\tau_i \cdot \dots \cdot \tau_k)^{-1} = (\tau_i \cdot \dots \cdot \tau_k)(\tau_i \cdot \dots \cdot \tau_k)^{-1} = \text{id}$$

- Poiché id non ha alcuna inversione per sua definizione stessa, si ha che $sgn(\text{id}) = 1$. Di conseguenza, si verifica che:

$$\begin{aligned} 1 = sgn(\text{id}) &= sgn(\sigma(\tau_i \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \dots \cdot \tau_k)^{-1}) = sgn(\sigma \cdot \tau_k \cdot \dots \cdot \tau_3 \cdot \tau_2 \cdot \tau_1) = \\ &= -sgn(\sigma \cdot \tau_k \cdot \dots \cdot \tau_3 \cdot \tau_2) = sgn(\sigma \cdot \tau_k \cdot \dots \cdot \tau_3) = \dots = (-1)^k \cdot sgn(\sigma) \end{aligned}$$

- Quindi, affermiamo che:

$$1 = (-1)^k \cdot sgn(\sigma) \implies sgn(\sigma) = (-1)^k$$

Corollary 8

Date due permutazioni $\sigma, \sigma' \in \mathcal{S}_n$, si verifica che:

$$sgn(\sigma\sigma') = sgn(\sigma) \cdot sgn(\sigma')$$

Dimostrazione:

- Data $\sigma = \tau_1 \cdot \dots \cdot \tau_k$ e $\sigma' = \tau'_1 \cdot \dots \cdot \tau'_j$, si ha che:

$$sgn(\sigma\sigma') = sgn(\tau_1 \cdot \dots \cdot \tau_k \cdot \tau'_1 \cdot \dots \cdot \tau'_j) = (-1)^{k+j} = (-1)^k (-1)^j = sgn(\sigma) \cdot sgn(\sigma')$$

Corollary 9

Data una permutazione $\sigma \in \mathcal{S}_n$, si verifica che:

$$sgn(\sigma^{-1}) = sgn(\sigma)$$

Dimostrazione:

- Poiché

$$1 = \text{sgn}(\text{id}) = \text{sgn}(\sigma\sigma^{-1}) = \text{sgn}(\sigma) \cdot \text{sgn}(\sigma^{-1})$$

allora si ha che:

$$1 = \text{sgn}(\sigma) \cdot \text{sgn}(\sigma^{-1}) \implies \text{sgn}(\sigma) = \text{sgn}(\sigma^{-1})$$

Definition 43

Denotiamo il sottogruppo $A_n \subseteq \mathcal{S}_n$ come **gruppo alterno di ordine n** , definito come:

$$A_n := \{\sigma \in \mathcal{S}_n \mid \text{sgn}(\sigma) = +1\}$$

Data la relazione che σ e σ' sono nella stessa classe laterale sinistra se e solo se

$$\begin{aligned} \sigma^{-1}\sigma' \in A_n &\implies 1 = \text{sgn}(\sigma^{-1}\sigma') = \text{sgn}(\sigma^{-1}) \cdot \text{sgn}(\sigma') = \\ &= \text{sgn}(\sigma) \cdot \text{sgn}(\sigma') \iff \text{sgn}(\sigma) = \text{sgn}(\sigma') \end{aligned}$$

Notiamo come \mathcal{S}_n venga partizionato in esattamente due classi laterali, una contenente tutte le permutazioni pari (coincidente con A_n) ed una contenente tutte le dispari.

Dunque, per il teorema di Lagrange, si ha che:

$$2 = |\mathcal{S}_n/A_n| = \frac{|\mathcal{S}_n|}{|A_n|} \implies |A_n| = \frac{|\mathcal{S}_n|}{2} = \frac{n!}{2}$$

Vogliamo ora dimostrare che data $\sigma \in \mathcal{S}_n$ e data la sua scomposizione in cicli $\sigma = \gamma_1 \dots \gamma_k$, si ha che $\text{sgn}(\sigma) = (-1)^{n-k}$.

Riprendiamo quindi la **relazione di coniugato** (sezione 3.5), ossia:

$$x \sim y \iff \exists a \in G \mid y = axa^{-1}$$

In particolare, nel **caso delle permutazioni**, dati $\sigma, \sigma' \in \mathcal{S}_n$ si ha che:

$$\exists \alpha \in \mathcal{S}_n \mid \sigma = \alpha\sigma\alpha^{-1} \implies \text{sgn}(\sigma') = \text{sgn}(\alpha) \cdot \text{sgn}(\sigma) \cdot \text{sgn}(\alpha^{-1})$$

Tuttavia, poiché $\text{sgn}(\alpha) = \text{sgn}(\alpha^{-1}) = \pm 1 \implies \text{sgn}(\alpha) \cdot \text{sgn}(\alpha^{-1}) = 1$, si ha che:

$$\begin{aligned} \text{sgn}(\sigma') &= \text{sgn}(\alpha) \cdot \text{sgn}(\sigma) \cdot \text{sgn}(\alpha^{-1}) = \\ &= \begin{cases} 1 \cdot \text{sgn}(\sigma) \cdot 1 & \text{sgn}(\alpha) = \text{sgn}(\alpha^{-1}) = 1 \\ (-1) \cdot \text{sgn}(\sigma) \cdot (-1) & \text{sgn}(\alpha) = \text{sgn}(\alpha^{-1}) = -1 \end{cases} = \text{sgn}(\sigma) \end{aligned}$$

Proposition 32

Dati $\sigma, \sigma' \in \mathcal{S}_n$, date le loro scomposizioni in cicli $\sigma = \gamma_1 \dots \gamma_k$ e $\sigma' = \gamma'_1 \dots \gamma'_h$ e date le lunghezze dei loro cicli d_j e d'_j , supponendo $d_1 \leq \dots \leq d_k$ e $d'_1 \leq \dots \leq d'_h$ si ha che:

$$\sigma \sim \sigma' \iff \begin{cases} k = h \\ d_1 = d'_1 \\ \dots \\ d_k = d'_h \end{cases}$$

Dimostrazione:

- Supponiamo che $\sigma \sim \sigma'$, dunque $\exists \alpha \in \mathcal{S}_n \mid \sigma' = \alpha \sigma \alpha^{-1}$
- Se $(i_1 \dots i_d)$ è un ciclo di σ , allora $(\alpha(i_1) \dots \alpha(i_d))$ è un ciclo di σ' . Difatti si ha che:

$$\sigma' \alpha(i_j) = \alpha \sigma \alpha^{-1} \alpha(i_j) = \alpha \sigma(i_j) = \begin{cases} \alpha(i_{j+1}) & \text{se } j < d \\ \alpha(i_1) & \text{se } j = d \end{cases}$$

- Ciò stabilisce quindi una corrispondenza biunivoca tra i cicli di σ e quelli di σ' (dunque $h = k$), i quali inoltre avranno la stessa lunghezza (dunque $d_i = d'_i$)
- Siano quindi $\sigma = (i_1 \dots i_{d_1}) \dots (j_1 \dots j_{d_2})$ e $\sigma' = (a_1 \dots a_{d'_1}) \dots (b_1 \dots b_{d'_2})$
- Definiamo $\alpha \in \mathcal{S}_n \mid \alpha(i_k) = a_k, \dots, \alpha(j_h) = b_h$
- Ad esempio, si avrà quindi che:

$$\alpha \sigma \alpha^{-1}(a_k) = \alpha \sigma(i_k) = \begin{cases} \alpha(i_{k+1}) & \text{se } k < d_1 \\ \alpha(i_1) & \text{se } k = d_1 \end{cases} = \begin{cases} a_{k+1} & \text{se } k < d_1 \\ a_1 & \text{se } k = d_1 \end{cases}$$

Esempi:

1. Date le seguenti permutazioni $\sigma, \sigma' \in S_6$, trovare $\alpha \in S_6$ tale che $\sigma' = \alpha \sigma \alpha^{-1} \implies \sigma' \sim \sigma$:

$$\begin{aligned} \sigma &= (13)(254)(876) \\ \sigma' &= (25)(184)(376) \end{aligned} \implies \alpha = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 2 & 1 & 5 & 4 & 8 & 6 & 7 & 3 \end{pmatrix}$$

2. Date le seguenti permutazioni $\sigma, \sigma' \in S_7$, trovare $\alpha \in S_7$ tale che $\sigma' = \alpha \sigma \alpha^{-1} \implies \sigma' \sim \sigma$:

$$\begin{aligned} \sigma &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 3 & 6 & 1 & 4 & 2 & 7 & 5 \end{pmatrix} = (4)(13)(2675) \\ \sigma' &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 6 & 5 & 7 \end{pmatrix} = (7)(56)(1234) \end{aligned} \implies \alpha = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 5 & 1 & 6 & 7 & 4 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

Proposition 33

Data $\sigma \in \mathcal{S}_n$ e data la sua scomposizione in cicli $\sigma = \gamma_1 \dots \gamma_k$, allora si ha che:

$$\text{sgn}(\sigma) = (-1)^{n-k}$$

Dimostrazione:

- Supponiamo che $\exists \sigma' \in \mathcal{S}_n \mid \sigma' \sim \sigma$. Si ha quindi che:

$$\sigma = (i_1 \dots i_{d_1})(i_{d_1+1} \dots i_{d_2}) \dots (j_1 \dots j_{d_k})$$

$$\sigma' = (1 \dots d_1)(d_1 + 1 \dots d_1 + d_2) \dots (n - d_k + 1 \dots n)$$

- Di conseguenza, σ' corrisponderà a:

$$\sigma' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & d_1 & d_1 + 1 & \dots & d_1 + d_2 & \dots & \dots & n - (d_k + 1) & \dots & n \\ 2 & 3 & \dots & 1 & d_1 + 2 & \dots & d_1 + 1 & \dots & \dots & n - (d_k + 1) + 1 & \dots & n - (d_k + 1) \end{pmatrix}$$

- Ricordando che $\sigma \sim \sigma' \implies \text{sgn}(\sigma') = \text{sgn}(\sigma)$, ci basterà trovare il segno di σ' per verificare la proposizione.
- Notiamo come affinché la permutazione mandi ogni elemento nel range $[1, d_1]$ (corrispondente al primo ciclo) in se stesso siano necessari $d_1 - 1$ trasposizioni adiacenti:

$$\begin{aligned} & \sigma \cdot \tau_{d_1-1, d_1} \cdot \tau_{d_1-2, d_1-1} \cdot \dots \cdot \tau_{2,3} \cdot \tau_{1,2} = \\ & = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & d_1 & d_1 + 1 & \dots & d_1 + d_2 & \dots & \dots & n - (d_k + 1) & \dots & n \\ 1 & 2 & \dots & d_1 & d_1 + 2 & \dots & d_1 + 1 & \dots & \dots & n - (d_k + 1) + 1 & \dots & n - (d_k + 1) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

- Analogamente, ogni altro range corrispondente al ciclo di lunghezza d_j di σ' necessiterà di $d_j - 1$ trasposizioni, in modo da ottenere la permutazione identica
- Di conseguenza, affermiamo che il numero di trasposizioni componenti σ' sia

$$\sum_{j=1}^k d_j - 1$$

dove k ricordiamo essere il numero di cicli della decomposizione di σ' .

- Poiché la somma di tutte le lunghezze dei cicli per definizione stessa corrisponde ad n (ossia il numero totale di elementi della permutazione), si ha che:

$$\sum_{j=1}^k d_j - 1 = \sum_{j=1}^k d_j - \sum_{j=1}^k 1 = n - k$$

- Concludiamo quindi che σ' è composto da $n - k$ trasposizioni adiacenti, implicando quindi che:

$$\text{sgn}(\sigma) = \text{sgn}(\sigma') = (-1)^{n-k}$$

Capitolo 6

Morfismi

Definition 44

Date due strutture algebriche (G, \cdot) e (H, \cdot) dello stesso tipo (dunque entrambi monoidi, gruppi, anelli, ...), definiamo come **morfismo** una funzione $f : G \rightarrow H$ tale che:

$$f(gh) = f(g) \cdot f(h), \forall g, h \in G$$

Attenzione:

Nel caso di anelli o strutture algebriche definite su più di una operazione binaria, è necessario **verificare la condizione di morfismo per tutte le operazioni**.

Ad esempio, nel caso in cui $(A, +, \cdot)$ e $(B, +, \cdot)$, la funzione $f : A \rightarrow B$ viene detta morfismo se e solo se:

- $f(a + b) = f(a) + f(b), \forall a, b \in A$
- $f(ab) = f(a)f(b), \forall a, b \in A$

Observation 20

Se (G, \cdot) è un gruppo con elemento neutro 1_G , (H, \cdot) è un gruppo con elemento neutro 1_H e $f : G \rightarrow H$ è un morfismo, allora:

1. $f(1_G) = 1_H$
2. $f(g^{-1}) = f(g)^{-1}, \forall g \in G$

Dimostrazione:

1. Dato $g \in G$, ne segue che:

$$\begin{aligned} f(g) &= f(1_G \cdot g) = f(1_G)f(g) \implies f(g)f(g)^{-1} = f(1_G)f(g)f(g)^{-1} \implies \\ &\implies 1_H = f(1_G) \cdot 1_H \implies f(1_G) = 1_H \end{aligned}$$

2. Dato $g \in G$ e dato $f(1_G) = 1_H$, ne segue che

$$\begin{aligned} f(1_G) = 1_H &\implies f(g \cdot g^{-1}) = 1_H \implies f(g)f(g^{-1}) = 1_H \implies \\ &\implies f(g^{-1}) = 1_H \cdot f(g)^{-1} \implies f(g^{-1}) = f(g)^{-1} \end{aligned}$$

6.1 Isomorfismi, Endomorfismi ed Automorfismi

Definition 45. Isomorfismo

Date due strutture algebriche G, H e dato il morfismo $f : G \rightarrow H$, se f è anche una funzione biettiva essa viene definita come **isomorfismo**

In tal caso, diciamo che G è **isomorfo** ad H (in simboli: $G \cong H$)

Observation 21

Se $f : G \rightarrow H$ è un **isomorfismo**, allora $f^{-1} : H \rightarrow G$ è un **isomorfismo**. Di conseguenza, $\forall g, h \in H$ si ha che:

$$f^{-1}(gh) = f^{-1}(g)f^{-1}(h)$$

Dimostrazione:

- Supponiamo che f^{-1} sia un morfismo biiettivo. Dati $h, h' \in H$, si ha che:

$$\begin{aligned} f^{-1}(hh') &= f^{-1}(h)f^{-1}(h') \implies f(f^{-1}(hh')) = f(f^{-1}(h)f^{-1}(h')) \implies \\ &\implies hh' = f(f^{-1}(h)) \cdot f(f^{-1}(h')) \implies hh' = hh' \end{aligned}$$

Esempi:

1. Definiamo come **radice n-esima dell'unità** (ossia 1) un numero $z \in \mathbb{C}$ tale che $z^n = 1$.

Come già visto nella sezione 2.3, l'equazione $z^n = 1$ dove $z \in \mathbb{C}$ ammette n radici. Di conseguenza, esistono n radici n-esime (z_0, \dots, z_{n-1}) tali che $z_k^n = 1$, dove $z_k := e^{i \cdot \frac{2\pi k}{n}}$.

Inoltre, poiché tutte le z_k differiscono solo di k all'esponente, denotiamo $\zeta = e^{i \cdot \frac{2\pi}{n}}$, ottenendo quindi che $\zeta^k = z_k$ (tale operazione risulta essere più comoda poiché ci permette di utilizzare le proprietà delle potenze)

A questo punto, definiamo

$$H : \{\text{radici n-esime di 1 in } \mathbb{C}\} : \{\zeta^0, \dots, \zeta^{n-1}\}$$

Dimostriamo che $(H, \cdot) \subseteq (\mathbb{C}^*, \cdot)$ è sottogruppo:

- $1 = \zeta^0 \implies 1 \in H$
- $z, w \in H \iff z^n = w^n = 1 \implies 1 = z^n w^n = (zw)^n \implies zw \in H$
- $z \in H \iff z^n = 1 \implies (z^{-1})^n = (z^n)^{-1} = 1^{-1} = 1 \implies z^{-1} \in H$

Vogliamo verificare che la funzione

$$f : (\mathbb{Z}_n, +) \rightarrow (H, \cdot) : [k] \mapsto \zeta^k$$

sia un isomorfismo. Sappiamo già che la funzione è biettiva poiché $|\mathbb{Z}_n| = |H|$. Verifichiamo quindi che sia un morfismo:

$$f([i] + [j]) = f([i])f([j]) \implies f([i+j]) = \zeta^i \cdot \zeta^j \implies f([k]) = \zeta^{i+j} \implies \zeta^k = \zeta^{i+j}$$

A questo punto, è necessario sottolineare che $[i] + [j] = [k] \implies i+j = k+nh, \exists h \in \mathbb{Z}$ (dove n ricordiamo essere la base di \mathbb{Z}_n). Di conseguenza, si ha che:

$$\zeta^k = \zeta^{i+j} \implies \zeta^k = \zeta^{k+nh} \implies \zeta^k = \zeta^k \cdot (\zeta^n)^h \implies \zeta^k = \zeta^k \cdot 1^h \implies \zeta^k = \zeta^k$$

2. Sia G un gruppo e sia $g \in G$. La funzione $f : (\mathbb{Z}, +) \rightarrow (G, \cdot) : n \mapsto g^n$ è un morfismo.

$$f(n+m) = g^{n+m} = g^n \cdot g^m = f(n)f(m)$$

Come dimostrato nella sezione 4.8, siccome $o(g) < +\infty$, allora $g^n = 1_G = g^0$ per qualche $n > 0$, implicando che $\exists n \neq 0 \mid g^n = g^0$, dunque f non può essere iniettiva.

Vogliamo quindi verificare che tale f possa essere iniettiva se e solo se $o(g) = +\infty$:

- Siccome $o(g) < +\infty \implies f$ non iniettiva, allora la negazione di tale affermazione implica che $o(g) = +\infty \implies f$ iniettiva
- Supponiamo per assurdo che f non sia iniettiva. Ciò implicherebbe che:

$$\begin{aligned} \exists n \neq m \mid g^n = g^m &\implies g^0 = 1_G = g^{-n} \cdot g^n = g^{-n} \cdot g^m = g^{m-n} \implies \\ &\implies \exists m - n \neq 0 \mid g^{m-n} = 1_G \end{aligned}$$

Come visto nella sezione 4.8, poiché $I(g) = I(d)$ e poiché $d > 0$ (dato che $\exists m - n \neq 0 \mid g^{m-n} = 1_G$, dunque $I(d)$ non può essere l'ideale principale generato da $d = 0$), ne può seguire solo che $o(g) = d$, dunque $o(g) < +\infty$.

Di conseguenza, concludiamo che f non iniettiva $\implies o(g) < +\infty$

3. La funzione $f : (\mathbb{Z}, +, \cdot) \rightarrow (\mathbb{Z}_n, +, \cdot) : k \mapsto [k]$ è un morfismo di anelli, poiché sia $[a+b] = [a] + [b]$ e $[ab] = [a][b]$ sono entrambi verificati per definizione stessa dell'operazione somma e prodotto su \mathbb{Z}_n

4. La funzione $f : (\mathbb{Z}_m, +, \cdot) \rightarrow (\mathbb{Z}_n, +, \cdot) : x \bmod m \rightarrow x \bmod n$ è un morfismo se e solo se $n \mid m$:

$$x \bmod m + y \bmod m = (x+y) \bmod m = (x+y) \bmod n$$

$$x \bmod m \cdot y \bmod m = (xy) \bmod m = (xy) \bmod n$$

Attenzione: l'ultimo passaggio di entrambe le equazioni è possibile se e solo se $n \mid m$.

5. Dati i gruppi (G, \cdot) e $(Bij(G), \circ)$, dove $Bij(G)$ è l'insieme di tutte le funzioni biettive di G , allora la funzione $f : G \rightarrow Bij(G) : g \mapsto L_g$, dove $L_g : G \rightarrow G : h \mapsto gh$, è un morfismo iniettivo $\forall k \in \mathbb{Z}$:

$$(L_g \circ L_h)(k) = L_{gh}(k) \implies L_g(L_h(k)) = (gh)k \implies g(h(k)) \implies ghk = ghk$$

6. Dato il gruppo (G, \cdot) e $g \in G$, la funzione $F_g : G \rightarrow G : h \mapsto ghg^{-1}$ è un morfismo:

$$F_g(h)F_g(h') = (ghg^{-1})(gh'g^{-1}) = ghgh'g^{-1} = F_g(hh')$$

Definition 46. Endomorfismo e Automorfismo

Se una funzione f è un morfismo da una struttura algebrica in se stessa, ossia $f : G \rightarrow G$, allora essa viene detta **endomorfismo**.

Se un endomorfismo è anche biiettivo, dunque è un isomorfismo $f : G \rightarrow G$, allora esso viene detto **automorfismo**.

6.2 Nucleo ed Immagine di un morfismo

Proposition 34. Nucleo ed Immagine di un morfismo

Ogni morfismo $f : G \rightarrow H$ tra due gruppi G, H (o altre strutture da essi derivanti, ad esempio anelli) determina un sottogruppo $Ker(f) \subseteq G$, detto **nucleo di f** , e un sottogruppo $Im(f) \subseteq H$, detto **immagine di f** , dove:

$$Ker(f) : \{g \in G \mid f(g) = 1_H\}$$

$$Im(f) : \{y \in H \mid f(x) = y, \exists x \in G\}$$

Dimostrazione:

- $Ker(f) \subseteq G$:

$$- f(1_G) = 1_H \implies 1_G \in Ker(f)$$

$$- x, y \in Ker(f) \implies f(x) = f(y) = 1_H \implies f(xy) = f(x)f(y) = 1_H \cdot 1_H = 1_H \implies xy \in Ker(f)$$

$$- x \in Ker(f) \implies f(x) = 1_H \implies 1_H = 1_H^{-1} = f(x)^{-1} = f(x^{-1}) \implies x^{-1} \in Ker(f)$$

- $Im(f) \subseteq H$:
 - $f(1_G) = 1_H \implies 1_G \in Im(f)$
 - $x, y \in Im(f) \implies x = f(g), y = f(h) \implies xy = f(g)f(h) = f(gh) \implies xy \in Im(f)$
 - $x \in Im(f) \implies x = f(g) \implies x^{-1} = f(g)^{-1} = f(g^{-1}) \implies x^{-1} \in Im(f)$

Observation 22

Un morfismo è **iniettivo** se e solo se il nucleo è **semplice**, ossia $Ker(f) = \{1_G\}$

Dimostrazione:

- Sappiamo già che $1_G \in Ker(f)$ è sempre valido. Supponendo f iniettiva, si ha che:

$$x \in Ker(f) \implies f(x) = 1_H = f(1_G) \iff x = 1_G$$

- Supponiamo $Ker(f) = \{1_G\}$. In tal caso si ha che:

$$g, g' \in Ker(f) \implies f(g) = f(g') \implies f(g)^{-1}f(g) = f(g)^{-1}f(g') \implies 1_H = f(g) = f(g^{-1}g')$$

Siccome 1_G è l'unico elemento appartenente a $Ker(f)$, ne segue che $g^{-1}g' = 1_G \implies g' = g$. Di conseguenza, si ha che

$$g = g' \implies f(g) = f(g')$$

Observation 23

Se $f : A \rightarrow B$ è un morfismo di anelli, allora

$$Ker(f) : \{a \in A \mid f(a) = 0_B\}$$

$$Im(f) : \{b \in B \mid f(a) = b, \exists a \in A\}$$

Giustificazione:

Poiché un anello $(A, +, \cdot)$ è un gruppo abeliano nella prima operazione e un monoide nella seconda, ne segue logicamente che il nucleo e l'immagine di f siano determinati dai gruppi $(A, +)$ e $(B, +)$

6.3 Teorema fondamentale di isomorfismo

Definiamo ora una **struttura algebrica intermedia tra sottogruppo ed ideale**, detta sottoanello:

Definition 47. Sottoanello

Dato un anello A definiamo $(B, +, \cdot) \subseteq (A, +, \cdot)$ come sottoanello se:

- $(B, +) \subseteq (A, +)$ è sottogruppo
- $x, y \in B \implies x \cdot y \in B$ (dunque chiusa nella seconda operazione)

Observation 24

Se $f : A \rightarrow B$ è un morfismo di anelli, allora

- $\text{Ker}(f)$ è un **ideale** di A
- $\text{Im}(f)$ è **sottoanello** di B

Dimostrazione:

- Abbiamo già dimostrato che $(\text{Ker}(f), +)$ e $(\text{Im}(f), +)$ sono entrambi sottogruppi di A
- $x \in \text{Ker}(f), y \in A \implies f(xy) = f(x)f(y) = 0_B \cdot f(y) = 0_B \implies xy \in \text{Ker}(f)$
- $x, y \in \text{Im}(f) \implies x = f(a), y = f(b), \exists a, b \in A \implies xy = f(a)f(b) = f(ab) \implies xy \in \text{Im}(f)$

Theorem 35. Teorema fondamentale di isomorfismo

Se $f : A \rightarrow B$ è un morfismo tra anelli, allora

$$A/\text{Ker}(f) \cong \text{Im}(f)$$

Dimostrazione:

- Mostriamo che esiste $\varphi : A/\text{Ker}(f) \rightarrow \text{Im}(f) : [a] \mapsto f(a)$ e che è **ben definita**, ossia che:

$$[a], [b] \in A/\text{Ker}(f) \mid [a] = [b] \implies f(a) = f(b)$$

è vero poichè:

$$\begin{aligned} [a] = [b] &\iff a \equiv b \pmod{\text{Ker}(f)} \iff b - a \in \text{Ker}(f) \iff \\ &\iff 0_B = f(b - a) = f(b) - f(a) \iff f(a) = f(b) \end{aligned}$$

- Mostriamo che φ è un **morfismo** sia nel prodotto che nella somma:

$$\varphi([a]) + \varphi([b]) = f(a) + f(b) = f(a + b) = \varphi([a + b])$$

$$\varphi([a])\varphi([b]) = f(a)f(b) = f(ab) = \varphi([ab])$$

- Mostriamo che φ è **iniettiva** poiché il nucleo è semplice:

$$[x] \in A/\text{Ker}(f) \mid \varphi([x]) = 0_B \iff f(x) = 0_B \iff x \in \text{Ker}(f) \iff [x] = [0_A]$$

- Mostriamo che φ è **suriettiva** per definizione stessa di $\text{Im}(f)$

$$b \in \text{Im}(f) \iff b = f(a), \exists a \in A \iff b = \varphi([a]), [a] \in A/\text{Ker}(f)$$

- Concludiamo quindi che $\varphi : A/\text{Ker}(f) \rightarrow \text{Im}(f)$ è un **isomorfismo**.

Caso particolare in \mathbb{Z}

Dato $\zeta := e^{i\frac{2\pi}{n}}$, la funzione seguente funzione è un morfismo:

$$f : (\mathbb{Z}, +, \cdot) \rightarrow (\mathbb{C}^*, +, \cdot) : k \mapsto \zeta^k$$

In particolare, si ha che:

$$\zeta^k = 1 \iff n \mid k \implies \text{Ker}(f) = I(n)$$

Dimostrazione:

- Vediamo che $I(n) \subseteq \text{Ker}(f)$

$$n \mid k \implies k = np \in I(n) \implies \zeta^k = \zeta^{np} = (\zeta^n)^p = 1_H^p = 1_H \in \text{Ker}(f)$$

- Vediamo che $\text{Ker}(f) \subseteq I(n)$. Per il teorema della divisione col resto euclidea, possiamo esprimere $k \in \text{Ker}(f), k = np + r, 0 \leq r < n$

$$1_H = \zeta^k = \zeta^{np+r} = (\zeta^n)^p \cdot \zeta^r = 1_H^p \cdot \zeta^r = \zeta^r$$

Siccome $\zeta^r = 1_H$ e $0 \leq r < n$, l'unico numero che soddisfa entrambe le condizioni è $r = 0$, dunque:

$$k = np + r = np \in I(n)$$

Inoltre, notiamo inoltre che, per loro definizione stessa, in tal caso si ha che $\text{Im}(f) = H(\zeta)$:

$$\begin{aligned} H(\zeta) &: \{\zeta^k \mid k \in \mathbb{Z}\} \\ \text{Im}(f) &: \{z \in \mathbb{C}^* \mid z = f(k) = \zeta^k, \exists k \in \mathbb{Z}\} \end{aligned}$$

Corollary 10

Dato il morfismo $f : (\mathbb{Z}, +, \cdot) \rightarrow (\mathbb{C}^*, +, \cdot) : k \mapsto \zeta^k$, per il teorema fondamentale di isomorfismo si ha che:

$$H(\zeta) = \text{Im}(f) \cong \mathbb{Z}/\text{Ker}(f) = \mathbb{Z}/I(n) = \mathbb{Z}_n$$

6.4 Sottogruppi normali

Abbiamo visto come gli ideali siano un concetto fondamentale all'interno degli anelli. Vediamo ora un concetto egualmente fondamentale all'interno dei gruppi, ossia i **sottogruppi normali**.

Observation 25

Se A è un anello e $B \subseteq A$ un suo sottoanello, $(A/B, +)$ è un gruppo abeliano con la somma $[x] + [y] = [x + y]$.

Se B è solo un sottoanello e non anche un ideale, allora il prodotto $[x][y] = [xy]$ non è ben definito, dunque $(A/B, +, \cdot)$ non è un anello commutativo

Giustificazione:

- Per dimostrare che il prodotto fosse ben definito, viene utilizzata la proprietà di chiusura esterna del prodotto degli ideali (ossia $x \in I, a \in A \implies xa \in I$)

Definiamo quindi un concetto analogo alle classi laterali sinistre, ossia le **classi laterali destre**, le quali ci permetteranno di dimostrare che il prodotto sia ben definito.

Definition 48. Classi laterali sinistre e destre

Sia (G, \cdot) un gruppo e sia $H \subseteq G$ sottogruppo. Possiamo definire due relazioni di equivalenza del tipo:

$$x \sim_S y \iff x^{-1}y \in H \qquad x \sim_D y \iff xy^{-1} \in H$$

Definiamo le classi di equivalenza generate da tali relazioni come **classi laterali sinistre** (per la prima relazione) e **classi laterali destre** (per la seconda relazione).

$$[x]_S : \{y \in G \mid x \sim_S y\} \qquad [x]_D : \{y \in G \mid x \sim_D y\}$$

Observation 26

Come visto nella sezione 4.1.1, si ha che:

$$[x]_S = xH = \{xh \mid h \in H\} \qquad [x]_D = Hx = \{hx \mid h \in H\}$$

Observation 27

La classe dell'elemento neutro di G è sia una classe laterale sinistra sia una classe laterale destra:

$$[1_G]_S = 1_G \cdot H = H = H \cdot 1_G = [1_G]_D$$

Observation 28

Se il sottogruppo non è commutativo, non è detto che $xH = Hx, \forall x \in G$ (si pensi ad esempio alle permutazioni)

Definition 49. Sottogruppo normale

Sia (G, \cdot) un gruppo e sia $H \subseteq G$ sottogruppo. Se si verifica che $xH = Hx$, allora tale sottogruppo viene definito **sottogruppo normale**

Attenzione: ciò non implica che il sottogruppo sia commutativo, ossia che $xh = hx, \forall x \in G, \forall h \in H$

Proposition 36

Dato (G, \cdot) gruppo e $H \subseteq G$ sottogruppo, le seguenti condizioni sono **equivalenti tra loro**:

1. H è un sottogruppo normale
2. $\forall g \in G, h \in H \implies ghg^{-1} \in H$
3. $g \in G, h \in H \implies \exists k \in H \mid gh = kg$

Dimostrazione:

Le tre condizioni si implicano vicendevolmente, creando una catena $(1) \implies 3) \implies 2) \implies 1)$ risultante quindi in un se e solo per ognuna di esse:

- $1) \implies 3)$

$$gh \in gH = Hg = \{kg \mid k \in H\} \implies gh = kg$$

- $3) \implies 2)$

$$g \in G, h \in H \implies \exists k \in H \mid gh = kg \implies ghg^{-1} = kgg^{-1} \implies ghg^{-1} = k \in H$$

- $2) \implies 1)$

– Prendiamo $gh \in gH$ e definiamo $ghg^{-1} =: k \in H$

– Allora si ha che

$$ghg^{-1} = k \implies ghg^{-1}g = kg \implies gh = kg \implies kg \in Hg \implies gH \subseteq Hg$$

– Prendiamo $xg \in Hg$ e definiamo $g^{-1}x(g^{-1})^{-1} = g^{-1}xg =: j \in H$

– Allora si ha che

$$g^{-1}xg = j \implies gg^{-1}xh = gj \implies gj \in gH \implies Hg \subseteq gH$$

– Siccome $gH = Hg$, allora H è normale

Observation 29

La condizione 2) è equivalente a richiedere che H sia l'unione di tutte le classi di equivalenza della relazione di coniugio

Observation 30

Un sottogruppo di un gruppo abeliano è sempre normale, poiché la condizione $xH = Hx$ viene soddisfatta dalla proprietà commutativa

Proposition 37

Se (G, \cdot) è un gruppo e $H \subseteq G$ è un sottogruppo normale, allora $(G/H, \cdot)$ è un gruppo dove il prodotto è ben definito

Dimostrazione:

- Dimostriamo che $[x][y] = [xy]$ sia ben definito, ossia che $[x] = [x'], [y] = [y'] \implies [xy] = [x'y']$

– Poiché H è normale, si ha che:

$$xH = Hx = [x] = [x'] = x'H = Hx'$$

$$yH = Hy = [y] = [y'] = y'H = Hy'$$

– Di conseguenza, si verifica che:

$$[x] = [x'] = xH = x'H \implies x' = xh, \exists h \in H$$

$$[y] = [y'] = yH \implies \exists h \in H, hy' \in Hy = yH \implies \exists k \in H, hy' = yk$$

– Infine, otteniamo che:

$$x'y' \in (x'y')H \implies x'y' = (xh)y' = xhy' = x(yk) = xyk \in xyH \implies [x'y'] = [xy]$$

- Dimostriamo quindi che $(G/H, \cdot)$ sia un gruppo
 - $([x][y])[z] = [xy][z] = [xyz] = [x][yz] = [x]([y][z])$
 - L'elemento neutro è $[1_G]$
 - L'elemento inverso è $[x^{-1}] = [x]^{-1}$

Corollary 11

Se $f : G \rightarrow H$ è un morfismo di gruppi, allora $\text{Ker}(f) \subseteq G$ è sottogruppo normale e $\text{Im}(f) \subseteq H$ è sottogruppo

Dimostrazione:

- Sappiamo già che $\text{Ker}(f) \subseteq G$ e che $\text{Im}(f) \subseteq H$ siano entrambi sottogruppi
- Verifichiamo quindi che $\text{Ker}(f)$ sia normale utilizzando la condizione 2):

$$g \in G, h \in \text{Ker}(f) \implies f(ghg^{-1}) = f(g)f(h)f(g)^{-1}$$

Siccome $h \in \text{Ker}(f) \implies f(h) = 1_H$, allora:

$$f(ghg^{-1}) = f(g)f(h)f(g)^{-1} = f(g)f(g)^{-1} = 1_H \implies ghg^{-1} \in \text{Ker}(f)$$

A questo punto, possiamo affermare una versione ancora più generica del teorema fondamentale di isomorfismo:

Theorem 38. Teorema fondamentale di isomorfismo

Se $f : G \rightarrow H$ è un morfismo tra gruppi, allora:

$$G/\text{Ker}(f) \cong \text{Im}(f)$$

Dimostrazione:

- Poiché $\text{Ker}(f)$ è un sottogruppo normale, sappiamo che $(G/\text{Ker}(f), \cdot)$ sia un gruppo con l'operazione di prodotto ben definita
- A questo punto, la dimostrazione risulta essere analoga a quella vista nel caso degli anelli (sezione 6.3)

Esempio:

- Sia G un gruppo. La funzione $f : \mathbb{Z} \rightarrow G : n \rightarrow g^n$ è un morfismo.
- Data la struttura di G e di f , si ha che:

$$\text{Im}(f) = H(g) = \{g^n \mid n \in \mathbb{Z}\}$$

$$\text{Ker}(f) = I(g) = \{n \in \mathbb{Z} \mid g^n = 1_G\}$$

- Poiché in \mathbb{Z} si ha che: $I(g) = I(d)$, $\exists! d \geq 0$ tale che:

$$- d > 0 \implies o(g) = d$$

$$- d = 0 \implies o(g) = +\infty$$

si ha che $\mathbb{Z}/\text{Ker}(f) = \mathbb{Z}/I(d)$

- Per il teorema fondamentale di isomorfismo, ne segue che:

$$H(g) = \text{Im}(f) \cong \mathbb{Z}/\text{Ker}(f) = \mathbb{Z}/I(d) = \begin{cases} \mathbb{Z} & \text{se } d = 0 \\ \mathbb{Z}_d & \text{se } d > 0 \end{cases}$$

- Concludiamo quindi che:

$$H(g) \cong \begin{cases} \mathbb{Z} & \text{se } o(g) = +\infty \\ \mathbb{Z}_d & \text{se } o(g) = d \end{cases}$$

Corollary 12

Se G è un gruppo finito dove $|G| = p$ dove $p \in \mathbb{P}$, allora

$$G \cong \mathbb{Z}_p$$

Dimostrazione:

- Poiché $|G| = p$ ne segue che $|H(g)| > 1$.
- Per il teorema di Lagrange, si ha che

$$|H(g)| \mid |G| = p \implies |H(g)| = \begin{cases} 1 \\ p \end{cases}$$

- Poiché abbiamo assunto $|H(g)| > 1$, l'unico caso possibile è che $|H(g)| = p$
- Siccome $|G| = p = |H(g)|$, allora il sottogruppo $H(g)$ coincide esattamente con G
- Seguendo la dimostrazione dell'esercizio precedente, possiamo concludere che

$$G = H \cong \mathbb{Z}_p$$

Corollary 13

Più in generale, se G è un gruppo finito dove $|G| = n, n \in \mathbb{N}$ e $\exists g \in G \mid o(g) = n$, allora:

$$G \cong \mathbb{Z}_n$$

Dimostrazione:

- Supponiamo che $\exists g \in G \mid o(g) = n$. In tal caso, si ha che:

$$o(g) = n \iff H(g) = \{1, g, \dots, g^{n-1}\}$$

- Siccome $H(g) \subseteq G$ e $|H(g)| = |G|$, allora $G = H(g)$
- Infine, siccome $o(g) = n \implies H(g) \cong \mathbb{Z}_n$, allora:

$$G = H(g) \cong \mathbb{Z}_n$$

Observation 31

Se $H \subseteq G$ è un sottogruppo normale, allora $f : G \rightarrow G/H : x \rightarrow [x]$ è un morfismo e $\text{Ker}(f) = H$

Dimostrazione:

- Verifichiamo che sia un morfismo:

$$f(xy) = [xy] = [x][y] = f(x)f(y)$$

- $\text{Ker}(f) = H$:

$$g \in \text{Ker}(f) \iff f(g) = [g] = [1_G] = 1_g \cdot H = H \iff g \in H$$

Esempi:

- Dato il gruppo simmetrico S_n , il gruppo alterno $A_n \subseteq S_n$ è un sottogruppo normale

$$\begin{aligned} \sigma \in A_n, \tau \in S_n &\implies \tau\sigma\tau^{-1} \implies \text{sgn}(\tau\sigma\tau^{-1}) = \\ &= \text{sgn}(\tau)\text{sgn}(\sigma)\text{sgn}(\tau^{-1}) = (\pm 1)(+1)(\pm 1) = +1 \implies \tau\sigma\tau^{-1} \in A_n \end{aligned}$$

- Dato $X : \{+1, -1\}$, si ha che $X \cong \mathbb{Z}_2$
- La funzione $\text{sgn} : S_n \rightarrow \{+1, -1\}$ è un morfismo

$$\text{sgn}(\sigma\sigma') = \text{sgn}(\sigma)\text{sgn}(\sigma')$$

dove si ha che $\text{Ker}(f) = A_n$, implicando che $\text{Ker}(f)$ sia normale

6.5 Gruppi diedrali

Definition 50. Gruppo diedrale

Definiamo come **gruppo diedrale** \mathcal{D}_n il gruppo delle **simmetrie di un poligono regolare di n lati**, dove con simmetrie intendiamo tutte le azioni che mantengono la figura simmetrica, ossia:

- Rotazioni di un angolo giro (ossia $\frac{2\pi}{n}$) in senso antiorario (o orario, vista come l'inverso di una rotazione antioraria)

$$\rho : \text{rotazione antioraria di } \frac{2\pi}{n}$$

- Riflessioni a specchio rispetto agli assi di simmetria del poligono (ogni poligono regolare possiede n assi di simmetria)

$$\sigma_i : \text{riflessione rispetto all'asse di simmetria } r_i$$

Attenzione: il prodotto è dato dalla composizione (dunque viene trattato come nel caso delle permutazioni), ossia $\rho\sigma(i) = \rho(\sigma(i))$

Observation 32

Dato \mathcal{D}_n , effettuare n volte una rotazione riporta il poligono allo stato iniziale (poiché $n \cdot \frac{2\pi}{n} = 2\pi$), dunque

$$\rho^n = \rho^0 = 1 \implies \rho^{n+k} = \rho^n \rho^k = \rho^0 \rho^k = \rho^k$$

Analogamente, poiché un poligono regolare di n lati possiede solo n assi di simmetria, si ha che:

$$\sigma_n = \sigma_0 \implies \sigma_{n+k} = \sigma_k$$

Observation 33

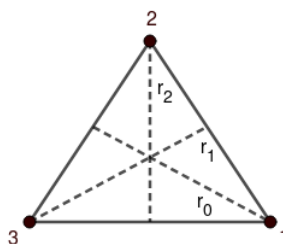
Per definizione stessa, ogni riflessione a specchio è uguale alla sua inversa.

Dunque, riflettere due volte rispetto allo stesso asse corrisponde alla simmetria neutra, ossia $\rho^0 = 1$

$$\sigma_i = \sigma_i^{-1} \implies \sigma_i^2 = 1$$

Esempi:

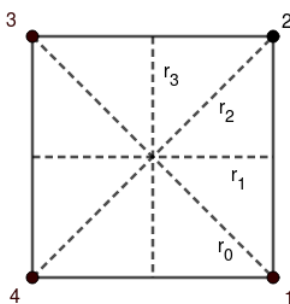
- Consideriamo il gruppo \mathcal{D}_3 , corrispondente alle simmetrie di un triangolo equilatero.



In tal caso, abbiamo che:

$$\mathcal{D}_3 : \{1, \rho, \rho^2, \sigma_0, \sigma_1, \sigma_2\}$$

- Consideriamo il gruppo \mathcal{D}_4 , corrispondente alle simmetrie di un quadrato.

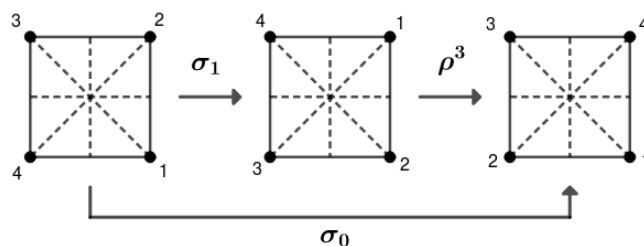


In tal caso, abbiamo che:

$$\mathcal{D}_4 : \{1, \rho, \rho^2, \rho^3, \sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$$

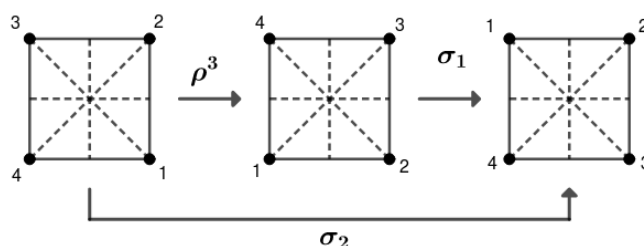
Notiamo inoltre come in \mathcal{D}_4 si ha:

$$\rho^3 \sigma_1 = \sigma_0$$



E che:

$$\sigma_1 \rho^3 = \sigma_2$$



Dunque, concludiamo che il prodotto non sia commutativo:

$$\rho^3 \sigma_1 \neq \sigma_1 \rho^3$$

Observation 34

Dato il gruppo \mathcal{D}_n , si ha che:

- $\rho^i \rho^j = \rho^{i+j(\bmod n)}$
- $\sigma_i \sigma_j = \rho^{i-j(\bmod n)}$
- $\rho^i \sigma_j = \sigma_{i+j(\bmod n)}$
- $\sigma_i \rho^j = \sigma_{i-j(\bmod n)}$

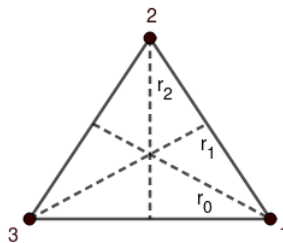
Proposition 39

Numerando i vertici del poligono, ogni simmetria **corrisponde** ad una permutazione dei vertici, dunque si verifica che \mathcal{D}_n è **iniettivamente incluso** in \mathcal{S}_n .

In generale, se $\alpha \in \mathcal{D}_n$, ovvero una simmetria del poligono regolare di n lati, manda il vertice i nel vertice j , allora la corrispondente permutazione $\sigma_\alpha \in \mathcal{S}_n$ manderà anch'essa i in j

Esempio:

- Consideriamo il gruppo \mathcal{D}_3 , numerando i vertici del triangolo corrispondente



In tal caso abbiamo che:

$$\begin{aligned} 1 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} & \sigma_0 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} \\ \rho &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} & \sigma_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} \\ \rho^2 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} & \sigma_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Corollary 14

Dato il gruppo \mathcal{D}_n e il sottogruppo $H \subseteq \mathcal{S}_n$ dove:

$$H : \{ \sigma_\alpha \in \mathcal{S}_n \mid \sigma_\alpha = \alpha, \alpha \in \mathcal{D}_n \}$$

Si ha che:

$$\mathcal{D}_n \cong H \subseteq \mathcal{S}_n$$

Dimostrazione:

- Siccome ad ogni simmetria in \mathcal{D}_n corrisponde una permutazione in $H \subseteq \mathcal{S}_n$, allora:

$$\begin{cases} \alpha, \sigma_\alpha : i \mapsto j \\ \beta, \sigma_\beta : j \mapsto k \end{cases} \implies \beta\alpha, \sigma_\beta\sigma_\alpha : i \mapsto k$$

dunque si ha che $\sigma_{\beta\alpha} = \sigma_\beta\sigma_\alpha$

- Dati i vertici del poligono v_1, \dots, v_n si quindi verifica che:

$$\alpha(v_i) = v_{\sigma_\alpha(i)}$$

- La funzione $f : (\mathcal{D}_n, \cdot) \rightarrow (H \subseteq \mathcal{S}_n, \cdot) : \alpha \mapsto \sigma_\alpha$ è un morfismo (ricordiamo che in entrambi i gruppi il prodotto è dato dalla composizione)

$$\alpha\beta(v_i) = \alpha(\beta(v_i)) = \alpha(v_{\sigma_\beta(i)}) = v_{\sigma_\alpha(i)\sigma_\beta(i)} = v_{\sigma_{\alpha\beta}(i)}$$

- In particolare, f è un isomorfismo poiché ad ogni simmetria corrisponde una ed una sola permutazione, implicando quindi che f sia iniettiva

6.6 Gruppo di Klein e Teorema di Cauchy

Definition 51. Gruppo di Klein

Definiamo come **gruppo di Klein** (o gruppo quadrimo) il più piccolo gruppo non ciclico:

$$\mathcal{K}_4 : \{1, a, b, c\}$$

dove si verifica che:

- $a^2 = b^2 = c^2 = 1 \implies o(a) = o(b) = o(c) = 2$
- $ab = ba = c$
- $bc = cb = a$
- $ac = ca = b$

Esempio:

- Consideriamo il gruppo $\mathcal{D}_2 : \{1, \rho, \sigma_0, \sigma_1\}$. Notiamo come:

$$- \rho^2 = \sigma_0^2 = \sigma_1^2 = 1$$

$$- \rho\sigma_0 = \sigma_0\rho = \sigma_1$$

$$- \rho\sigma_1 = \sigma_1\rho = \sigma_0$$

$$- \sigma_1\sigma_0 = \sigma_0\sigma_1 = \rho$$

Dunque, concludiamo facilmente che $\mathcal{D}_2 \cong \mathcal{K}_4$

Proposition 40

Sia G un gruppo finito dove $|G| = 4$. Allora, si verifica che:

$$G \cong \mathbb{Z}_4 \text{ oppure } G \cong \mathcal{K}_4$$

Dimostrazione:

- Sia $a \neq 1 \in G$. Per Lagrange, sappiamo che $o(a) \mid |G| = 4 \iff o(a) = 1, 2, 4$
- Come visto nella sezione 6.4, sappiamo che

$$\exists a \in G \mid o(a) = 4 \implies G \cong \mathbb{Z}_4$$

- Ipotizziamo ora che non sia ciclico. Se invece $G : \{1, a, b, c\}$ dove $o(a) = o(b) = o(c) = 2$. Verifichiamo che in tal caso $ab = c$:
 - Supponiamo per assurdo che $ab = 1$

$$ab = 1 \implies b = a^{-1} = a$$

il che è impossibile

- Supponiamo per assurdo che $ab = a$

$$ab = a \implies a^{-1}ab = a^{-1}a \implies b = 1$$

il che è impossibile

- Supponiamo per assurdo che $ab = b$

$$ab = b \implies abb^{-1} = bb^{-1} \implies a = 1$$

il che è impossibile

- Siccome $ab \neq 1$, $ab \neq a$ e $ab \neq b$, allora l'unica possibilità affinché valga la chiusura del gruppo è $ab = c$

- Analogamente, dimostriamo che $ac = b$ e $bc = a$, concludendo quindi che:

$$G \cong \mathcal{K}_4$$

Theorem 41. Teorema di Cauchy

Dato un gruppo finito G e un numero primo $p \in \mathbb{P}$, si verifica che:

$$p \mid |G| \implies \exists g \in G \mid o(g) = p$$

In particolare, se $|G| = q \in \mathbb{P}$, allora G è ciclico poiché

$$\exists g \in G \mid o(g) = q \implies |G| = o(g) \implies G = H(g)$$

Proposition 42

Sia G un gruppo finito dove $|G| = 6$. Allora, si verifica che:

$$G \cong \mathbb{Z}_6 \text{ oppure } G \cong \mathcal{S}_3$$

Dimostrazione:

- Come già visto, se $\exists g \in G \mid o(g) = 6$, allora $G \cong \mathbb{Z}_6$
- Ipotizziamo ora che non sia ciclico. Per il teorema di Cauchy sappiamo che

$$- \exists \alpha \in G \mid o(\alpha) = 3 \implies o(\alpha^k) = 3, k \neq 0$$

$$- \exists \beta \in G \mid o(\beta) = 2 \implies \beta^{-1} = \beta$$

- Notiamo che:

$$\alpha^i \beta = \alpha^j \beta \iff \alpha^i = \alpha^j \iff 1 = \alpha^j \alpha^{-i} = \alpha^{j-i} \iff 0 = j - i \iff j = i$$

e che

$$\alpha^i = \alpha^j \beta \iff \alpha^{i-j} = \beta$$

- Tuttavia, l'ultima affermazione risulta essere assurda poiché:

$$o(\beta) = 2 \quad o(p^{i-j}) = \begin{cases} o(1) = 1 & \text{se } i = j \\ o(p^k) = 3 & \text{se } i \neq j \end{cases}$$

di conseguenza si ha che $\beta \neq \alpha^{i-j}$.

- Mostriamo inoltre che $\beta\alpha = \alpha^2\beta$:

- Supponiamo per assurdo che $\beta\alpha = 1$

$$\beta\alpha = 1 \implies \alpha = \beta^{-1} \implies \alpha = \beta$$

il che è impossibile

- Supponiamo per assurdo che $\beta\alpha = \alpha$

$$\beta\alpha = \alpha \implies \beta = 1$$

il che è impossibile

- Supponiamo per assurdo che $\beta\alpha = \alpha^2$

$$\beta\alpha = \alpha^2 \implies \beta = \alpha$$

il che è impossibile

- Supponiamo per assurdo che $\beta\alpha = \beta$

$$\beta\alpha = \beta \implies \alpha = 1$$

il che è impossibile

- Supponiamo per assurdo che $\beta\alpha = \alpha\beta$, implicando che $o(\beta\alpha) = o(\alpha\beta)$:

$$* (\alpha\beta)^1 = \alpha\beta$$

$$* (\alpha\beta)^2 = (\beta\alpha)(\beta\alpha) = \beta\beta\alpha\alpha = \beta^2\alpha^2 = \alpha^2$$

$$* (\alpha\beta)^3 = (\alpha\beta)(\alpha\beta)^2 = (\alpha\beta)\alpha^2 = \alpha^3\beta = \beta$$

$$* (\alpha\beta)^4 = (\alpha\beta)(\alpha\beta)^3 = (\alpha\beta)\beta = \alpha\beta^2 = \alpha$$

$$* (\alpha\beta)^5 = (\alpha\beta)(\alpha\beta)^4 = (\alpha\beta)\alpha = \alpha^2\beta$$

$$* (\alpha\beta)^6 = (\alpha\beta)(\alpha\beta)^5 = (\alpha\beta)\alpha^2\beta = \beta^2\alpha^3 = 1$$

dunque $o(\alpha\beta) = 6 \implies o(\alpha\beta) = |G| \implies G = H(\beta\alpha)$, ossia che il gruppo sia ciclico, contro l'ipotesi che invece esso non lo sia.

- Quindi l'unica possibilità è che $\beta\alpha = \alpha^2\beta$

- Concludiamo quindi che:

$$G = \{1, \alpha, \alpha^2, \beta, \alpha\beta, \alpha^2\beta\}$$

- A questo punto, possiamo stendere una **tavola di Cayley**, ossia una tavola moltiplicativa:

	1	α	α^2	β	$\alpha\beta$	$\alpha^2\beta$
1	1	α	α^2	β	$\alpha\beta$	$\alpha^2\beta$
α	α	α^2	1	$\alpha\beta$	$\alpha^2\beta$	β
α^2	α^2	1	α	$\alpha^2\beta$	β	$\alpha\beta$
β	β	$\alpha^2\beta$	$\alpha\beta$	1	α^2	α
$\alpha\beta$	$\alpha\beta$	β	$\alpha^2\beta$	α	1	α^2
$\alpha^2\beta$	$\alpha^2\beta$	$\alpha\beta$	β	α^2	α	1

- A questo punto, ricordando le proprietà dei prodotti dei gruppi diedrali (sezione 6.5), si ottiene una mappatura univoca $\alpha^i \mapsto \rho^i$ e analogamente $\alpha^i\beta \mapsto \sigma_i$. Ciò implica quindi che:

$$G \cong \mathcal{D}_3$$

- Inoltre, abbiamo visto che $\mathcal{D}_3 \cong H \subseteq \mathcal{S}_3$ dove

$$H : \{\sigma_\alpha \in \mathcal{S}_3 \mid \sigma_\alpha = \alpha, \alpha \in \mathcal{D}_3\}$$

e dove $|\mathcal{D}_3| = 2 \cdot 3 = 6$ e $|\mathcal{S}_3| = 3! = 6$.

- Affinché l'isomorfismo esista, necessariamente si ha che $|\mathcal{D}_3| = |H| = 6$.

Tuttavia, si ha che $H \subseteq \mathbb{S}_3 \wedge |H| = |\mathcal{S}_3| \implies H = \mathbb{S}_3$, dunque concludiamo che:

$$G \cong \mathcal{D}_3 \cong H = \mathcal{S}_3$$

Capitolo 7

Polinomi

Definition 52. Anello polinomiale

Dato un anello commutativo A definiamo l'**insieme dei polinomi** aventi come coefficienti elementi in A come:

$$A[x] : \{a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \mid a_0, \dots, a_n \in A, a_n \neq 0\}$$

Inoltre, $A[x]$ risulta essere un **anello commutativo**

Dimostrazione:

- Dati due polinomi $p(x), q(x) \in A[x]$, dunque definiti come

$$p(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad q(x) = \sum_{i=0}^m b_i x^i$$

abbiamo che:

- Nell'anello la somma è definita come:

$$p(x), q(x) \in A[x] \implies p(x) + q(x) = \sum_{i=0}^{\max(n,m)} (a_i + b_i) x^i$$

- Nell'anello il prodotto è definita come:

$$p(x), q(x) \in A[x] \implies p(x) \cdot q(x) = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=0}^m a_i b_j x^{i+j} \right)$$

- Gli assiomi di associatività e commutatività possono essere facilmente verificati tramite la definizione stessa della somma
- L'elemento neutro nella somma è il polinomio neutro $e(x) = 0$, mentre nel prodotto è il polinomio costante $d(x) = 1$
- L'elemento inverso nella somma è:

$$\forall p(x) \in A[x], \exists -p(x) \in A[x] \mid p(x) + (-p(x)) = 0$$

- L'elemento inverso nel prodotto non esiste poiché, per via della definizione data di polinomio, non esiste un inverso moltiplicativo.

Si pensi ad esempio a $p(x) = x$. Tale polinomio non ammette inverso moltiplicativo poiché $\frac{1}{x}$ non è un polinomio.

Di conseguenza, $A[x]$ non può essere un campo.

Proposition 43

Ogni elemento $a \in A$ può essere visto come un polinomio costante $p(x) = a \in A[x]$.
Dunque, si ha che $A \subseteq A[x]$

Observation 35

Se K è un campo, allora $K[x]$ è comunque un anello commutativo, poiché non ammette comunque l'esistenza dell'inverso nel prodotto

Definition 53. Grado di un polinomio

Dato $p(x) \in A[x]$ indichiamo il **grado del polinomio** come $\deg(p(x))$, dove:

- $p(x) = 0 \iff \deg(p(x)) = -\infty$ (polinomio nullo)
- $p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \neq 0, a_n \neq 0 \iff \deg(p(x)) = n$

Definition 54. Coefficienti direttori

Dato $p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \neq 0 \in A[x]$ definiamo a_n come **coefficiente direttore** del polinomio

Observation 36

Siano $p(x), q(x) \in A[x]$. Si verifica che:

$$\deg(p(x)q(x)) = \deg(p(x)) + \deg(q(x))$$

Dimostrazione:

- Poiché il prodotto è definito come

$$p(x) \cdot q(x) = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=0}^m a_i b_j x^{i+j} \right) = a_0 b_0 + a_0 b_1 x^1 + \dots + a_n b_m x^{n+m}$$

allora $\deg(p(x)q(x)) = \deg(p(x)) + \deg(q(x)) = n + m$

Proposition 44

Gli unici elementi invertibili di $K[x]$ sono i polinomi costanti, dunque

$$K[x]^* = K^* \subseteq K \subseteq K[x]$$

Dimostrazione:

- Siccome $\forall a(x), b(x) \in K[x]$ si ha che

$$\deg(a(x)b(x)) \geq \deg(a(x)) \geq 1$$

e dato che $\deg(1) = 0$, allora

$$\nexists a(x)^{-1} \in K[x] \mid \deg(a(x)a(x)^{-1}) = \deg(1) \geq 1$$

Dunque

$$\deg(a(x)) \geq 1 \implies a(x)^{-1} \notin K[x]^*$$

- Tale dimostrazione, inoltre, riprova che non esista sempre un invertibile moltiplicativo in $K[x]$
- Se invece $\deg(a(x)) = 0$, allora $\exists a_0 \neq 0 \in K \mid a(x) = a_0 \implies a(x) \in K$.
- Poiché K è un campo, ogni elemento è invertibile, dunque $\exists a_0^{-1} \in K$
- Posto quindi $b_0 := a_0^{-1}$ e $b(x) = b_0$, allora

$$a(x)b(x) = a_0b_0 = a_0a_0^{-1} = 1$$

- Dunque, ogni polinomio costante è invertibile, implicando che, poiché ogni polinomio costante appartiene anche a K , allora

$$K[x]^* = K^* \subseteq K \subseteq K[x]$$

7.1 Divisione con resto di polinomi

Theorem 45. Divisione con resto di polinomi

Dati $a(x), b(x) \in K[x]$ con $b(x) \neq 0$ allora

$$\exists! q(x), r(x) \in K[x] \mid a(x) = b(x)q(x) + r(x)$$

dove $\deg(r(x)) < \deg(b(x))$

Dimostrazione unicità (esistenza omessa)

- Supponiamo che

$$b(x)q_1(x) + r_1(x) = a(x) = b(x)q_2(x) + r_2(x)$$

dove $\deg(r_1(x)), \deg(r_2(x)) < \deg(b(x))$

- Quindi deduciamo che:

$$\deg(r_1(x)), \deg(r_2(x)) < \deg(b(x)) \implies \deg(r_1(x) - r_2(x)) < \deg(b(x))$$

- Dunque si ha che:

$$\begin{aligned} b(x)q_1(x) + r_1(x) &= b(x)q_2(x) + r_2(x) \implies b(x)[q_1(x) - q_2(x)] = r_2(x) - r_1(x) \implies \\ \implies \deg(r_2(x) - r_1(x)) &= \deg(b(x)) + \deg(q_1(x) - q_2(x)) \end{aligned}$$

- Se $\deg(q_1(x) - q_2(x)) \geq 0$ avremmo $\deg(r_2(x) - r_1(x)) \geq \deg(b(x))$, contraddicendo l'ipotesi
- Di conseguenza, l'unica possibilità è:

$$q_1(x) - q_2(x) = 0 = r_1(x) - r_2(x)$$

e dunque che $q_1(x) = q_2(x)$ e $r_1(x) = r_2(x)$

Esempio:

- Calcolo della divisione con resto di $a(x) = 2x^4 + 3x^3 - 2x^2 + x - 4$ e $b(x) = x^2 - x + 1$

$$\begin{array}{r|rrrrr} +2x^4 & +3x^3 & -2x^2 & +x & -4 & \\ -2x^4 & +2x^3 & -2x^2 & & & \\ \hline & +5x^3 & -4x^2 & +x & -4 & \\ & -5x^3 & +5x^2 & -5x & & \\ \hline & & x^2 & -4x & -4 & \\ & & -x^2 & +x & -1 & \\ \hline & & & +3x & -5 & \end{array}$$

Quindi concludiamo che:

$$2x^4 + 3x^3 - 2x^2 + x - 4 = (x^2 - x + 1)(2x^2 + 5x + 1) + 3x - 5$$

7.1.1 Regola di Ruffini

Method 3. Regola di Ruffini

Dati $a(x), b(x) \in K[x]$ dove $b(x) = x - c, \exists c \in K$, è facile calcolare il quoziente $q(x) \in K[x]$ e il resto $r(x) = r_0 \in K$ della divisione di $a(x)$ per $b(x)$:

1. Sia $a(x) = a_0 + \dots + a_n x^n$ con $a_n \neq 0$
2. Poiché $\deg(a(x)) = \deg(b(x)) + \deg(q(x)) = 1 + \deg(q(x)) \implies \deg(q(x)) = \deg(a(x)) - 1$, allora

$$q(x) = q_0 + \dots + q_{n-1} x^{n-1}$$

dove q_0, \dots, q_{n-1} sono dati da:

- $q_{n-1} = a_n$
- $q_{n-1-k} = cq_{n-k} + a_{n-k}$
- $r_0 = cq_0 + a_0$

3. In formato grafico, riassumiamo tale concetto con:

$$\begin{array}{c|cccc|c} & a_n & a_{n-1} & \dots & a_1 & a_0 \\ c & & cq_{n-1} & \dots & cq_1 & cq_0 \\ \hline & q_{n-1} & q_{n-2} & \dots & q_0 & r_0 \end{array}$$

Esempio:

- Calcolare la divisione tra $a(x) = x^4 - 3x^3 + 2x - 5$ e $b(x) = x + 2$

$$\begin{array}{c|cccc|c} & 1 & -3 & 0 & 2 & -5 \\ -2 & & -2 & 10 & -20 & 36 \\ \hline & 1 & -5 & 10 & -18 & 31 \end{array}$$

Dunque si ha che:

$$x^4 - 3x^3 + 2x - 5 = (x + 2)(x^3 - 5x^2 + 10x - 18) + 31$$

Proposition 46. Teorema del fattore

Dato $p(x) \in K[x]$ e dato $c \in K$

$$p(c) = 0 \iff x - c \mid p(x)$$

in tal caso, c viene detta **radice (o zero) del polinomio**

Dimostrazione:

- $x - c \mid p(x) \implies p(c) = 0$

$$x - c \mid p(x) \implies p(x) = (x - c)q(x) \implies p(c) = (c - c)q(c) = 0$$

- $p(c) = 0 \implies x - c \mid p(x)$
 - Siano $q(x)$ e $r(x)$ il quoziente e il resto della divisione di $p(x)$ per $(x - c)$

$$p(x) = (x - c)q(x) + r(x)$$

- Per ipotesi, si ha che:

$$0 = p(c) = (c - c)q(c) + r(x) \implies r(x) = 0$$

dunque, la divisione non ha resto, implicando che:

$$(x - c) \mid p(x)$$

Corollary 15

Dato $p(x) \in K[x] \mid \deg(a(x)) = n$, allora $a(x)$ ha al massimo n radici

Inoltre, se $p(x) \in \mathbb{C}[x]$, allora, per il teorema fondamentale dell'algebra, esistono esattamente n radici

Dimostrazione:

- Sia $\deg(p(x)) = n$ e siano per assurdo c_1, \dots, c_m dove $m > n$ e $c_i \neq c_j \iff i \neq j$ tali che

$$p(c_i) = 0, \forall 1 \leq i \leq m$$

- Poiché un polinomio può essere scritto come il prodotto di tutte le sue radici, si verifica che:

$$\begin{cases} x - c_1 \mid p(x) \\ \vdots \\ x - c_m \mid p(x) \end{cases} \implies \underbrace{(x - c_1) \cdot \dots \cdot (x - c_m)}_{q(x)} \mid p(x)$$

- Poiché $\deg(q(x)) = m$, tale divisione risulta essere impossibile, poiché un polinomio non può dividere un polinomio di grado minore

7.2 Proprietà dell'anello polinomiale

Observation 37

L'anello commutativo $K[x]$ è un **dominio di integrità** poiché

$$\nexists p(x) \neq 0 \in K[x] \mid p(x) \mid 0$$

Corollary 16

Poiché $K[x]$ è un dominio di integrità, dati $p(x), q(x) \in K[x]$ si ha che:

$$I(p(x)) = I(q(x)) \iff p(x) = c \cdot q(x), \exists c \in K[x]^*$$

(dimostrazione nella sezione 4.3)

Theorem 47

L'anello commutativo $K[x]$ è un **dominio ad ideali principali**, dunque

$$\exists! p(x) \in K[x] \mid I = I(p(x))$$

Dimostrazione unicità:

- Se $I = \{0\}$, allora $I = I(0)$
- Sia invece $p(x) \neq 0 \in I$ il polinomio del più piccolo grado possibile all'interno dell'ideale tale che $I = I(p(x))$. Ciò implica che

$$q(x) \in K[x] \mid \deg(q(x)) < \deg(p(x)) \implies q(x) = 0$$

Dimostrazione esistenza:

- $I \subseteq I(p(x))$
 - Sia $p(x) \neq 0 \in I$ il polinomio del grado più piccolo possibile all'interno dell'ideale.
 - Dato $a \in I \mid a(x) = p(x)q(x) + r(x)$ si ha che $\deg(r(x)) < \deg(p(x))$. Tuttavia, si ha anche che

$$a(x), p(x), q(x) \in I \implies r(x) = a(x) - p(x)q(x) \in I$$

implicando che $r(x)$ sia il polinomio del grado più piccolo possibile (poiché $\deg(r(x)) < \deg(p(x))$).

- Ne segue quindi necessariamente che $r(x) = 0 \implies \deg(r(x)) = -\infty < \deg(p(x))$, dunque che:

$$r(x) = 0 = a(x) - p(x)q(x) \implies a(x) = p(x)q(x) \in I(p(x))$$

- $I(p(x)) \subseteq I$
 - Dato $p(x) \neq 0 \in I$ il polinomio del grado più piccolo possibile all'interno dell'ideale, si verifica automaticamente che

$$p(x) \neq 0 \in I \implies \forall a(x) \in I(p(x)) \mid a(x) = p(x)q(x) \in I$$

poiché, come già provato nell'implicazione precedente, si ha $r(x) = 0$

Definition 55. MCD di due polinomi

Dati $a(x), b(x) \in K[x]$, definiamo $d(x) := MCD(a(x), b(x))$ il polinomio per cui

$$d(x) \in K[x] \mid I(d(x)) = I(a(x), b(x))$$

dove $I(a(x), b(x)) : \{a(x)p(x) + b(x)q(x), \exists p(x), q(x) \in K[x]\}$

In particolare, individuuiamo l'analogo dell'**identità di Bezout**:

$$\exists p(x), q(x) \mid a(x)p(x) + b(x)q(x) = d(x)$$

Definition 56. mcm di due polinomi

Dati $a(x), b(x) \in K[x]$, definiamo $m(x) := mcm(a(x), b(x))$ il polinomio per cui

$$m(x) \in K[x] \mid I(m(x)) = I(a(x)) \cap I(b(x))$$

Corollary 17

Dalle due definizioni date, ne segue naturalmente che:

$$p(x) \mid a(x) \wedge p(x) \mid b(x) \implies p(x) \mid d(x) := MCD(a(x), b(x))$$

e che:

$$a(x) \mid q(x) \wedge b(x) \mid q(x) \implies m(x) := mcm(a(x), b(x)) \mid q(x)$$

Observation 38

Poiché $K[x]$ è un dominio di integrità, sappiamo che

$$I(p(x)) = I(q(x)) \iff p(x) = c \cdot q(x), \exists c \in K[x]^*$$

Ciò implica che dati $a(x), b(x) \in K[x]$, si ha che $d(x) := MCD(a(x), b(x))$ e $m(x) := mcm(a(x), b(x))$ possano essere ben definiti solo a meno di una costante moltiplicativa non nulla.

Affinché valga l'unicità, basta imporre che i polinomi $d(x)$ e $m(x)$ abbiano coefficiente direttore $a_n = 1$

Definition 57. Polinomio monico

Dato $a(x) = a_0 + \dots + a_n x^n \in K[x]$, definiamo $a(x)$ come **polinomio monico** se $a_n = 1$

Method 4

Dati $a(x), b(x) \in K[x]$, possiamo calcolare $d(x) := \text{MCD}(a(x), b(x))$ tramite l' **algoritmo di Euclide** e $m(x) := \text{mcm}(a(x), b(x))$ tramite il **teorema fondamentale dell'aritmetica**:

$$m(x) = \frac{a(x)b(x)}{d(x)}$$

Observation 39

Dati polinomi $a(x), b(x) \in K[x]$, $c \in K$ e sia $d(x) := \text{MCD}(a(x), b(x)) \in K[x]$. Allora si ha che:

$$a(c) = 0 = b(c) \iff d(c) = 0$$

Ovvero le uniche radici in comune tra due polinomi sono le radici del loro MCD

Proposition 48

Dato $p(x) \in K[x]$, esso è irriducibile se e solo se è primo

Dimostrazione:

- Sappiamo già che in un dominio di integrità si ha:

$$p(x) \text{ primo} \implies p(x) \text{ irriducibile}$$

(*dimostrazione nella sezione 4.3.1*)

- Supponiamo quindi che $p(x) \in K[x]$ sia irriducibile. Dunque si ha che:

$$d(x) \mid p(x) \implies p(x) = d(x)q(x) \implies d(x) \in K[x]^* \vee q(x) \in K[x]^*$$

- Poiché $K[x]^* = K^*$ allora si verifica che

$$d(x) \in K[x]^* = K^* \implies d(x) = c \in K^*$$

oppure che

$$q(x) \in K[x]^* = K^* \implies q(x) = k \in K^* \implies d(x) = k^{-1}p(x)$$

- Dato $a(x) \in K[x]$, supponiamo che $p(x) \mid a(x)b(x)$. Si ha quindi che:

$$a(x)b(x) = p(x)q(x), \exists q(x) \in K[x]$$

- Supponiamo che $p(x) \nmid a(x)$. Si ha quindi che $\text{MCD}(p(x), a(x)) = 1$.

Per l'identità di Bezout, si ha che:

$$\begin{aligned} \exists f(x), g(x) \in K[x] \mid \text{MCD}(p(x), a(x)) = 1 &= p(x)f(x) + a(x)g(x) \implies \\ b(x) &= p(x)b(x)f(x) + a(x)b(x)g(x) \implies b(x) = p(x)b(x)f(x) + p(x)q(x)g(x) \implies \\ &\implies b(x) = p(x)[q(x)f(x) + g(x)b(x)] \implies p(x) \mid b(x) \implies p(x) \mid a(x)b(x) \end{aligned}$$

- Se invece $p(x) \mid a(x)$ allora $\text{MCD}(p(x), a(x)) \neq 1$, allora $p(x) \nmid b(x)$
- Concludiamo quindi che $p(x) \mid a(x)b(x) \implies p(x) \mid a(x) \vee p(x) \mid b(x)$

Theorem 49. Fattorizzazione in polinomi irriducibili e monici

Dato $p(x) \neq 0 \in K[x]$ allora $\exists! q_1(x), \dots, q_k(x) \in K[x]$ polinomi irriducibili e monici e $\exists! c \in K^*$ tali che:

$$p(x) = c \cdot q_1(x) \cdot \dots \cdot q_k(x)$$

Dimostrazione esistenza:

- Se $\deg(p(x)) = 1$, allora $p(x)$ è irriducibile (e di conseguenza anche primo).

Difatti, se esistesse una fattorizzazione di $p(x)$ (dunque non fosse irriducibile) avremmo che:

$$\deg(p(x)) = \deg(q_1(x)) + \dots + \deg(q_k(x))$$

dove $\deg(q_i(x)) > 0$ (poiché altrimenti sarebbe una costante), implicando quindi che $\deg(p(x)) > 1$ contro l'ipotesi

- Sia quindi $\deg(p(x)) > 1$, implicando che $p(x)$ non sia irriducibile, dunque $p(x) = a(x)b(x)$
- Supponiamo per ipotesi induttiva che $a(x)$ e $b(x)$ siano fattorizzati in polinomi irriducibili e monici

$$a(x) = c \cdot q_1(x) \cdot \dots \cdot q_k(x)$$

$$b(x) = c' \cdot q'_1(x) \cdot \dots \cdot q'_j(x)$$

si ha quindi che:

$$p(x) = c \cdot c' \cdot q_1(x) \cdot q'_1(x) \cdot \dots \cdot q_k(x) \cdot q'_j(x)$$

Dimostrazione unicità:

- Se $\deg(p(x)) = 0$ allora $p(x) = c$
- Se $\deg(p(x)) > 0$, supponiamo due fattorizzazioni possibili per $p(x)$

$$c \cdot q_1(x) \cdot \dots \cdot q_k(x) = p(x) = c' \cdot q'_1(x) \cdot \dots \cdot q'_j(x)$$

- Notiamo che se $p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$, allora $c = a_n = c'$. Supponendo che $q_1(x), \dots, q_k(x), q'_1(x), \dots, q'_j(x) \in K[x]$ siano monici, allora anche il loro prodotto è monico

$$p(x) = a_0 + \dots + a_nx^n = c = c' \cdot q_1(x) \cdot \dots \cdot q_k(x) = c' \cdot q'_1(x) \cdot \dots \cdot q'_j(x) \implies$$

$$\implies q_1(x) \mid p(x) = c' \cdot q'_1(x) \cdot \dots \cdot q'_j(x) \implies$$

$$q_1(x) \mid q'_1(x) \vee \dots \vee q_1(x) \mid q'_j(x)$$

- Supponiamo che $q_1(x) \mid q'_1(x) \implies q'_1(x) = k \cdot q_1(x), \exists k \in K^*$, implicando che:

$$c \cdot q_1(x) \cdot \dots \cdot q_k(x) = p(x) = c' \cdot q'_1(x) \cdot \dots \cdot q'_j(x) \implies$$

$$\implies c \cdot q_1(x) \cdot \dots \cdot q_k(x) = p(x) = c' \cdot k \cdot q_1(x) \cdot \dots \cdot q'_j(x) \implies$$

$$\implies c \cdot q_2(x) \cdot \dots \cdot q_k(x) = \frac{p(x)}{q_1(x)} = c' \cdot k \cdot q'_2(x) \cdot \dots \cdot q'_j(x)$$

- Poiché $\deg(\frac{p(x)}{q(x)}) < \deg(p(x))$ possiamo concludere che $k = j$ e, a meno di riordinare i fattori, possiamo assumere che $q_2(x) = q'_2(x), \dots, q_k(x) = q'_j(x)$

Proposition 50

Dato $p(x) \in \mathbb{C}[x]$, esso è irriducibile se e solo se $\deg(p(x)) = 1$

Dimostrazione:

- Dato $p(x) \neq 0 \in K[x]$, se $\deg(p(x)) > 1$ allora $p(x)$ non è irriducibile poiché per via del teorema fondamentale dell'algebra si ha che:

$$\exists z \in \mathbb{C} \mid p(z) = 0 \iff x - z \mid p(x) \iff$$

$$\iff p(x) = (x - z)q(x), \exists q(x) \in K[x] \implies \deg(q(x)) = \deg(p(x)) - 1$$

- Se invece $\deg(p(x)) = 1$ allora

$$p(x) = a(x)b(x) \implies \begin{cases} \deg(a(x)) = 0 \wedge \deg(b(x)) = 1 \implies a(x) \in K[x]^* \\ \deg(a(x)) = 1 \wedge \deg(b(x)) = 0 \implies b(x) \in K[x]^* \end{cases}$$

e dunque $p(x)$ è irriducibile

Proposition 51

Dato $p(x) \in \mathbb{R}[x]$, esso è irriducibile se e solo se $\deg(p(x))$ oppure $p(x) = ax^2 + bx + c \mid \Delta := b^2 - 4ac < 0$

Dimostrazione:

- Se $\deg(p(x)) = 1$, la dimostrazione è analoga a quella della proposizione precedente
- Se invece $\deg(p(x)) = 2$ e $p(x)$ non ha radici $x_1, x_2 \in \mathbb{R}$, allora $p(x)$ è irriducibile
- Difatti, se $p(x)$ fosse riducibile si avrebbe che:

$$\deg(p(x)) = 2 \wedge p(x) = a(x)b(x) \implies \begin{cases} \deg(a(x)) = 1 \\ \deg(b(x)) = 1 \end{cases}$$

- Se $a(x) = cx + d$ dove $c \neq 0, d \in \mathbb{R}$, allora $x = -c^{-1}d$ sarebbe una radice di $a(x)$ e di conseguenza anche di $p(x)$, contraddicendo l'ipotesi
- Sia quindi $p(x) \in \mathbb{R}[x]$ irriducibile con $\deg(p(x)) > 1$. Per il teorema fondamentale dell'algebra, $\exists z \in \mathbb{C} \mid p(z) = 0$. Se tale z fosse anche reale ($z \in \mathbb{R}$), allora si avrebbe che

$$(x - z) \mid p(x) \implies p(x) = (x - z)q(x) \mid (x - z), q(x) \in \mathbb{R}[x]$$

- Dato quindi $p(x) = a_0 + \dots + a_n x^n$ dove $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$, allora si ha che ogni coefficiente è uguale al suo coniugato (poiché $a_i := c + i \cdot 0 = c - i \cdot 0 =: \overline{a_i}$):

$$a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R} \implies a_1 = \overline{a_1}, \dots, a_n = \overline{a_n}$$

- Per le proprietà dei coniugati (sezione 2), si ha che:

$$p(\bar{z}) = a_0 + \dots a_n \bar{z}^n = a_0 + \dots a_n \overline{z^n} = \overline{a_0} + \dots \overline{a_n} \overline{z^n} = \overline{a_0 + \dots + a_n z^n} = \overline{p(z)}$$

- Siccome però per ipotesi $p(z) = 0$, allora si ha che anche $\overline{p(z)} = \bar{0} = 0$. Di conseguenza, si ha che anche \bar{z} è una radice di $p(x)$, da cui deriva che:

$$x - z \mid p(x) \wedge x - \bar{z} \mid p(x) \implies (x - z)(x - \bar{z}) \mid p(x) \implies x^2 - (z + \bar{z})x + z \cdot \bar{z} \mid p(x)$$

- Siccome $z + \bar{z} = (c + id)(c - id) = 2c \in \mathbb{R}$ e $z \cdot \bar{z} = (c + id)(c - id) = c^2 + d^2 \in \mathbb{R}$, allora ne segue che $x^2 - (z + \bar{z})x + z \cdot \bar{z} = x^2 - 2cx + c^2 + d^2 \in \mathbb{R}$
- Poiché $p(x)$ è irriducibile, in definitiva abbiamo che:

$$p(x) = k(x^2 - 2cx + c^2 + d^2), \exists k \in R^*$$

- Possiamo concludere, quindi, che $p(x)$ dove $\deg(p(x)) > 1$ è irriducibile se e solo se:

$$\Delta := (-2kc)^2 - 4k^2(c^2 + d^2) = 4k^2c^2 - 4k^2(c^2 + d^2) = -4kd^2 < 0$$

Theorem 52

Sia $p(x) \in \mathbb{Z}[x]$ dove $p(x) = a_0 + \dots a_n x^n$ con $a_0, a_n \neq 0$. Se $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ è radice di $p(x)$ e $MCD(a, b) = 1$, allora

$$p\left(\frac{a}{b}\right) = 0 \implies a \mid a_0 \wedge b \mid a_n$$

Dimostrazione:

- Sia $p(x) = a_0 + \dots a_n x^n \in \mathbb{Z}[x]$. Supponendo che $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q} \mid MCD(a, b) = 1$ sia radice di $p(x)$, allora

$$\begin{aligned} 0 &= p\left(\frac{a}{b}\right) = a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) + \dots + a_n \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^n \implies \\ \implies b^n \cdot 0 &= b^n \left(a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) + \dots + a_n \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^n \right) \implies \\ \implies 0 &= a_0 b^n + \dots + a_{n-1} \cdot a^{n-1} \cdot b + a_n a^n \implies \\ \implies a_n a^n &= -a_0 b^n - \dots - a_{n-1} \cdot a^{n-1} \cdot b \implies \\ \implies a_n a^n \cdot \frac{1}{b} &= -a_0 b^{n-1} - \dots - a_{n-1} \cdot a^{n-1} \implies b \mid a_n a^n \end{aligned}$$

- Poiché $MCD(a, b) = 1 \implies MCD(a^n, b) = 1$, allora

$$b \mid a_n a^n \implies b \mid a_n$$

- Seguendo gli stessi passaggi, arriviamo a dimostrare che $MCD(a, b) = 1 \implies MCD(a, b^n) = 1$ implica che

$$a \mid a_0 b^n \implies a \mid a_0$$

Esempi:

- Dato $p(x) = x^3 - 19x - 30$, se $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ fosse soluzione, allora

$$p\left(\frac{a}{b}\right) \implies a \mid a_0 = 30 \wedge b \mid a_n = 1$$

quindi le uniche soluzioni possibili di $p(x)$ possono essere:

$$x = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 5, \pm 6, \pm 10, \pm 15, \pm 30$$

- Dato $p(x) = 6x^3 - 11x^2 + 6x - 1$, se $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ fosse soluzione, allora

$$p\left(\frac{a}{b}\right) \implies a \mid a_0 = -1 \wedge b \mid a_n = 6$$

quindi le uniche soluzioni possibili di $p(x)$ possono essere:

$$x = \pm 1, \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{1}{3}, \pm \frac{1}{6}$$

7.3 Polinomi in \mathbb{Z}_p

Poiché anche \mathbb{Z}_p è un campo, è possibile trattare anche polinomi a coefficienti in \mathbb{Z}_p .

Ad esempio, ricordando che in \mathbb{Z}_p si ha $([a] + [b])^p = [a]^p + [b]^p$, allora

$$\begin{aligned} (1+x)^p &\equiv 1^p + x^p \equiv 1 + x^p \pmod{n} \implies \\ \implies (1+x)^{pn} &\equiv (1+x^p)^n \pmod{n} \implies \sum_{i=0}^{np} \binom{np}{i} x^i \equiv \sum_{i=0}^n \binom{n}{j} x^{p(n-j)} \pmod{n} \end{aligned}$$

Corollary 18

Dato $p \in \mathbb{P}$ si ha che:

$$\begin{aligned} \binom{np}{i} &\equiv 0 \pmod{p} \iff p \nmid i \\ \binom{np}{pj} &\equiv \binom{n}{j} \pmod{p} \end{aligned}$$

Lemma 53

Dato $p \in \mathbb{P}$, si ha che:

$$\prod_{0 < a < p} (x - a) \equiv x^{p-1} - 1 \pmod{p}$$

Dimostrazione:

- Per il piccolo teorema di Fermat, dato $0 < a < p$ dove $p \in \mathbb{P}$ si ha che:

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p} \implies a^{p-1} - 1 \equiv 0 \pmod{p}$$

dunque $[a] \in \mathbb{Z}_p$ è una radice di $q(x) = x^{p-1} - [1] \in \mathbb{Z}_p[x]$

- Siccome $[a]$ è soluzione, allora per il teorema dei fattori si ha che:

$$\begin{aligned} x - [a] \mid x^{p-1} - [1], \forall 0 < a < p &\implies \prod_{0 < a < p} (x - [a]) \mid x^{p-1} - [1] \implies \\ &\implies x^{p-1} - [1] = k \cdot \prod_{0 < a < p} (x - [a]), \exists k \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

- Poiché il coefficiente direttore di $q(x)$ è 1, allora necessariamente si ha che $k = 1$, concludendo che:

$$\prod_{0 < a < p} (x - a) \equiv x^{p-1} - 1 \pmod{p}$$

Observation 40

Dato $p \in \mathbb{P}$, si ha che:

$$\prod_{0 < a < p} (x - a) = \sum_{k=1}^p (-1)^{p-k-1} \begin{bmatrix} p \\ k \end{bmatrix} x^{k-1}$$

dove $\begin{bmatrix} p \\ k \end{bmatrix}$ è un **numero di Stirling di prima specie senza segno**, ossia il numero di permutazioni in \mathcal{S}_p aventi k cicli

Esempio:

- Dato

$$S_3 : \{(1)(2)(3), (12)(3), (13)(2), (23)(1), (123), (132)\}$$

si ha che:

$$\begin{bmatrix} 3 \\ 1 \end{bmatrix} = 2, \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \end{bmatrix} = 3, \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix} = 1$$

Lemma 54

Se $d \mid p - 1$, l'equazione $x^d \equiv 1 \pmod{p}$ ammette d soluzioni distinte in \mathbb{Z}_p

Dimostrazione:

- Supponiamo che $d \mid p - 1 \implies p - 1 = dk, \exists k \in \mathbb{Z}$
- Per dimostrazione precedente, sappiamo che

$$\prod_{0 < a < p} (x - a) \equiv x^{p-1} - 1 = x^{nd} - [1] = (x^d - [1])^n = (x^d - [1]) \underbrace{(x^d - [1])^{n-1}}_{q(x)} \pmod{p}$$

- Sempre per dimostrazione precedente, si ha che:

$$x - [a] \mid x^d - [1] \iff [a]^d = [1], \forall 0 < a < p$$

oppure che

$$x - [a] \mid q(x)$$

- Per motivi di grado, riapplicando tale procedimento su $q(x)$ e sui suoi fattori, otteniamo esattamente d radici di $x^d - [1]$

Lemma 55

Se $d \mid p - 1$, allora $\exists [a] \in \mathbb{Z}_p^* \mid o([a]) = d$

Dimostrazione:

- Se $d = 1$, allora $\exists 1 \in \mathbb{Z}_p^* \mid o([1]) = 1$
- Se $d = q^k$ dove $q \in \mathbb{P}$, allora per il lemma precedente si ha che $x^{q^k} - [1] = [0]$ ha q^k soluzioni.
- Siccome $x^{q^{k-1}} - [1] = [0]$ ha $q^{k-1} - 1$ soluzioni, allora $\exists [a] \in \mathbb{Z}_p^*$ che è soluzione della prima ma non della seconda, implicando che:

$$o([a]) \mid q^k \wedge o([a]) \nmid q^{k-1} \implies o([a]) = q^k$$

- Supponiamo per induzione di aver verificato tale condizione per tutti gli n divisori più piccoli di d .

Sia quindi $d = nq^k$ dove $q \in \mathbb{P} \mid MCD(n, q^k) = 1$. Per induzione, si ha che:

$$\exists [b], [c] \in \mathbb{Z}_p \mid o([b]) = n, o([c]) = q^k$$

- Come visto nella sezione 4.8, allora

$$MCD(o([b]), o([c])) = 1 \implies \exists a \in \mathbb{Z}_p \mid [a] = [bc] \implies o([a]) = nq^k = d$$

Corollary 19

Dato il gruppo (\mathbb{Z}_p, \cdot) dove $p \in \mathbb{P}$, tale gruppo è sempre ciclico, poiché:

$$p - 1 \mid p - 1 \implies \exists [a] \in \mathbb{Z}_p^* \mid o([a]) = p - 1 = |\mathbb{Z}_p^*| \iff \mathbb{Z}_p^* = H([a])$$

Capitolo 8

Spazi vettoriali

Definition 58. Spazio vettoriale

Dato un campo K , i cui elementi vengono detti **scalari**, definiamo uno **spazio vettoriale** V , i cui elementi vengono detti **vettori**, sul campo K .

$(V, +)$ è un gruppo abeliano munito di un'operazione aggiuntiva detta **prodotto con scalare**

$$\cdot : K \times V \rightarrow V : (\lambda, v) \mapsto w$$

la quale rispetta le seguenti proprietà:

- $\forall s, t \in K, v \in V \implies s(t \cdot v) = stv = (s \cdot t)v$ (Associatività scalare)
- $1 \in K, v \in V \implies 1 \cdot v = v$ (Elemento neutro)
- $\forall s, t \in K, v \in V \implies (s + t)v = sv + tv$ (Distributività vettoriale)
- $\forall s \in K, v, w \in V \implies s(v + w) = sv + sw$ (Distributività scalare)

Esempio fondamentale:

- Lo spazio vettoriale $V = K^n = \underbrace{K \times K \times \dots \times K}_{n \text{ volte}}$ corrisponde a:

$$V = K^n = \{(x_1, \dots, x_n) \mid x_1, \dots, x_n \in K\}$$

- Presi dunque due vettori $v, w \in V = K^n$, si ha che

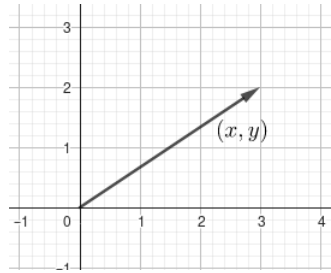
$$\begin{cases} v := (t_1, \dots, t_n) \in V = K^n \\ w := (s_1, \dots, s_n) \in V = K^n \end{cases} \implies v + w := (t_1 + s_1, \dots, t_n + s_n) \in V = K^n$$

- Preso invece uno scalare $\lambda \in K$, si ha che:

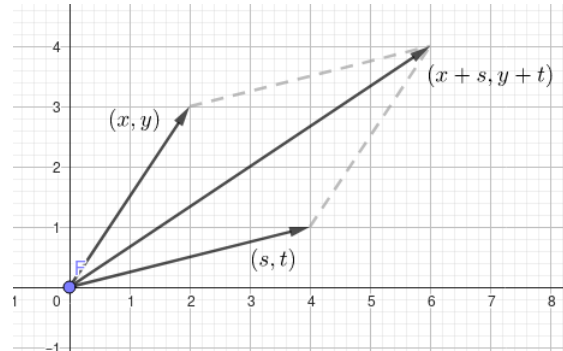
$$\lambda \cdot v = (\lambda t_1, \dots, \lambda t_n) \in V = K^n$$

Volendo dare un'interpretazione geometrica al tutto, prendiamo come esempio lo spazio vettoriale \mathbb{R}^2 .

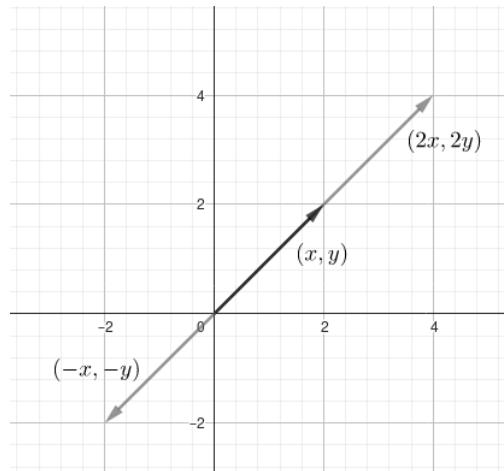
Dato $v := (x, y) \in \mathbb{R}^2$, possiamo rappresentare tale vettore come:



Dato anche $w := (s, t) \in \mathbb{R}^2$, la somma vettoriale $v + w$ corrisponde al *metodo del parallelogramma*:



Dato $\lambda \in \mathbb{R}$, si ha che il vettore $\lambda \cdot v$ ha la stessa direzione del vettore v , ma con lunghezza aumentata o diminuita e verso uguale o invertito



Observation 41

Dato $0_v \in V$, ossia l'elemento neutro di V (detto vettore nullo), e $0 \in K$, ossia l'elemento neutro di K , si ha che:

- $\forall \lambda \in K \implies \lambda \cdot 0_v = 0_v$
- $\forall w \in V \implies 0 \cdot w = 0_v$

8.1 Span e Base di uno spazio

Definition 59. Sottospazio vettoriale

Dato lo spazio vettoriale V definito su K , definiamo $W \subseteq V$ come sottospazio vettoriale di V in K se:

- $(W, +) \subseteq (V, +)$ è un sottogruppo
- $w \in W, \lambda \in K \implies \lambda w \in W$

Esempi:

- $\mathbb{Z}^n \subseteq \mathbb{R}^n$ non è sottospazio vettoriale poiché non verifica la seconda condizione
- $\mathbb{R}_{>0}^n \subseteq \mathbb{R}^n$ non è sottospazio vettoriale poiché non verifica nessuna delle due condizioni

Definition 60. Span

Dato uno spazio vettoriale V su K e dei vettori $v_1, \dots, v_n \in V$, definiamo **Span** (o sottospazio generato da v_1, \dots, v_n) l'insieme di tutte le **combinazioni lineari** di tali vettori:

$$\text{Span}(v_1, \dots, v_n) : \{\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n \mid \lambda_1, \dots, \lambda_n \in K\}$$

Verifica condizioni per il sottospazio:

- $0_V = 0 \cdot v_1 + \dots + 0 \cdot v_n \in \text{Span}(v_1, \dots, v_n)$
- $v, w \in \text{Span}(v_1, \dots, v_n) \implies v + w = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n + \mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n = (\lambda_1 + \mu_1)v_1 + \dots + (\lambda_n + \mu_n)v_n \in \text{Span}(v_1, \dots, v_n)$
- $v \in \text{Span}(v_1, \dots, v_n) \implies -v = (-\lambda_1)v_1 + \dots + (-\lambda_n)v_n \in \text{Span}(v_1, \dots, v_n)$
- $v \in \text{Span}(v_1, \dots, v_n), c \in K \implies cv = (c\lambda_1)v_1 + \dots + (c\lambda_n)v_n \in \text{Span}(v_1, \dots, v_n)$

Definition 61. Insieme di generatori

Dato uno spazio vettoriale V su K e dei vettori $v_1, \dots, v_n \in V$, definiamo tali vettori come **insieme di generatori di V** se $V = \text{Span}(v_1, \dots, v_n)$

Definition 62. Indipendenza lineare

Dato uno spazio vettoriale V su K e dei vettori $v_1, \dots, v_n \neq 0_V \in V$, definiamo tali vettori come **linearmente indipendenti** se

$$\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n = 0_V \iff \lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0$$

In caso contrario, vengono detti linearmente dipendenti

Definition 63. Base

Dato uno spazio vettoriale V su K e dei vettori $v_1, \dots, v_n \neq 0_V \in V$, definiamo tali vettori come una **base** se sono un insieme di generatori e linearmente indipendenti

Esempio:

- Dato lo spazio vettoriale $V = K^n$, consideriamo i seguenti vettori $e_1, \dots, e_n \in V$:
 - $e_1 = (1, 0, 0, \dots, 0, 0)$
 - $e_2 = (0, 1, 0, \dots, 0, 0)$
 - $e_3 = (0, 0, 1, \dots, 0, 0)$
 - \vdots
 - $e_n = (0, 0, 0, \dots, 0, 1)$
- Tali vettori vengono detto **base canonica di V** , difatti:
 - e_1, \dots, e_n sono generatori di V

$$v = (t_1, t_2, \dots, t_n) \in V \iff v = (t_1, 0, \dots, 0) + (0, t_2, \dots, 0) + \dots + (0, 0, \dots, t_n) \iff$$

$$\iff v = t_1 e_1 + t_2 e_2 + \dots + t_n e_n \in \text{Span}(e_1, e_2, \dots, e_n)$$
 - e_1, \dots, e_n sono linearmente indipendenti:

$$\lambda_1 e_1 + \dots + \lambda_n e_n = (0, \dots, 0) \iff (\lambda_1, 0, \dots, 0) + \dots + (0, 0, \dots, \lambda_n) = (0, \dots, 0) \iff$$

$$(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) = (0, \dots, 0) \iff \lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0$$

Observation 42

Dato uno spazio vettoriale V su K , i vettori $v_1, \dots, v_n \neq 0_V \in V$ sono linearmente indipendenti se e solo se v_1, \dots, v_{n-1} sono linearmente indipendenti e $v_n \notin \text{Span}(v_1, \dots, v_{n-1})$

Dimostrazione (solo in un verso):

- Supponiamo che $v_1, \dots, v_n \neq 0_V \in V$ siano linearmente indipendenti, dunque che

$$\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n = 0_V \iff \lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0$$
- Se si avesse $\lambda_n \neq 0$, allora

$$\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n = 0_V \iff \lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0 \implies \lambda_n v_n = -\lambda_1 v_1 - \dots - \lambda_{n-1} v_{n-1} \implies$$

$$\implies v_n = -\lambda_n^{-1} \lambda_1 v_1 - \dots - \lambda_n^{-1} \lambda_{n-1} v_{n-1} \implies v_n \in \text{Span}(v_1, \dots, v_{n-1})$$
- Di conseguenza, si ha che $\lambda_n = 0 \implies v_n \notin \text{Span}(v_1, \dots, v_{n-1})$ e che:

$$\lambda_n = 0 \implies \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_{n-1} v_{n-1} + \lambda_n v_n = 0_V \implies$$

$$\implies \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_{n-1} v_{n-1} = 0_V \iff \lambda_1 = \dots = \lambda_{n-1} = 0 = \lambda_n$$

Proposition 56

Se i vettori $v_1, \dots, v_k \in \text{Span}(w_1, \dots, w_n) \subseteq V$ sono linearmente indipendenti, allora $k \leq n$

Dimostrazione:

- Supponiamo $v_1 \neq 0_V \in \text{Span}(w_1, \dots, w_n)$, dunque

$$v = \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_n w_n \neq 0_V \iff \exists i \in [1, n] \mid \lambda_i \neq 0$$

- A meno di riordinare i termini, supponiamo $\lambda_1 \neq 0$

$$\begin{aligned} v &= \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_n w_n \implies \lambda_1 w_1 = v - \lambda_2 w_2 - \dots - \lambda_n w_n \implies \\ \implies w_1 &= \lambda_1^{-1} v + (-\lambda_1^{-1} \lambda_2) w_2 - \dots + (-\lambda_1^{-1} \lambda_n) w_n \implies w_1 \in \text{Span}(v_1, w_2, \dots, w_n) \end{aligned}$$

- Poiché $w_1 = \mu_1 v_1 + \mu_2 w_2 + \dots + \mu_n w_n \in \text{Span}(v_1, w_2, \dots, w_n)$, allora

$$\begin{aligned} u \in \text{Span}(w_1, \dots, w_n) &\implies u = \lambda_1 w_1 + \lambda_2 w_2 + \dots + \lambda_n w_n = \\ &= \lambda_1 (\mu_1 v_1 + \mu_2 w_2 + \dots + \mu_n w_n) + \lambda_2 w_2 + \dots + \lambda_n w_n = \\ &= (\lambda_1 \mu_1) v_1 + (\lambda_1 \lambda_2 \mu_2) w_2 + \dots + (\lambda_1 \lambda_n \mu_n) w_n \implies u \in \text{Span}(v_1, w_2, \dots, w_n) \end{aligned}$$

- Dunque si ha che $\text{Span}(w_1, \dots, w_n) \subseteq \text{Span}(v_1, w_2, \dots, w_n)$. Analogamente, possiamo dimostrare che $\text{Span}(v_1, w_2, \dots, w_n) \subseteq \text{Span}(w_1, \dots, w_n)$, concludendo quindi che $\text{Span}(v_1, w_2, \dots, w_n) = \text{Span}(w_1, \dots, w_n)$
- Supponiamo quindi induttivamente che

$$\text{Span}(v_1, \dots, v_i, w_{i+1}, \dots, w_n) = \text{Span}(w_1, \dots, w_n)$$

- Dato $v_{i+1} = \mu_1 v_1 + \dots + \mu_i v_i + \lambda_{i+1} w_{i+1} + \dots + \lambda_n w_n \in \text{Span}(v_1, \dots, v_i, w_{i+1}, \dots, w_n)$, se si avesse $(\lambda_{i+1}, \dots, \lambda_n) = (0, \dots, 0)$, allora avremmo

$$v_{i+1} = \mu_1 v_1 + \dots + \mu_i v_i \implies 0_V = (-1)v_{i+1} + \mu_1 v_1 + \dots + \mu_i v_i$$

contraddicendo l'ipotesi che v_1, \dots, v_k siano linearmente indipendenti, dunque l'unica possibilità è

$$v_{i+1} = \mu_1 v_1 + \dots + \mu_i v_i + \lambda_{i+1} w_{i+1} + \dots + \lambda_n w_n \neq 0_V \iff \exists j \in [i+1, n] \mid \lambda_j \neq 0$$

- A meno di riordinare i termini, supponiamo $\lambda_{i+1} \neq 0$

$$\begin{aligned} v_{i+1} &= \mu_1 v_1 + \dots + \mu_i v_i + \lambda_{i+1} w_{i+1} + \dots + \lambda_n w_n \implies \\ \implies \lambda_{i+1} w_{i+1} &= v_{i+1} - \mu_1 v_1 - \dots - \mu_i v_i - \lambda_{i+2} w_{i+2} - \dots - \lambda_n w_n \implies \\ w_{i+1} &= \lambda_{i+1}^{-1} v_{i+1} + (-\lambda_{i+1}^{-1} \mu_1) v_1 + \dots + (-\lambda_{i+1}^{-1} \mu_i) v_i + (-\lambda_{i+1}^{-1} \lambda_{i+2}) w_{i+2} + \dots + (-\lambda_{i+1}^{-1} \lambda_n) w_n \\ \implies w_{i+1} &\in \text{Span}(v_1, \dots, v_i, v_{i+1}, w_{i+2}, \dots, w_n) \end{aligned}$$

- Dunque si ha che

$$\text{Span}(v_1, \dots, v_i, w_{i+1}, w_{i+2}, \dots, w_n) \subseteq \text{Span}(v_1, \dots, v_i, v_{i+1}, w_{i+2}, \dots, w_n)$$

.

Analogamente, possiamo dimostrare che

$$\text{Span}(v_1, \dots, v_i, v_{i+1}, w_{i+2}, \dots, w_n) \subseteq \text{Span}(v_1, \dots, v_i, w_{i+1}, w_{i+2}, \dots, w_n)$$

concludendo quindi che

$$\text{Span}(v_1, \dots, v_i, v_{i+1}, w_{i+2}, \dots, w_n) = \text{Span}(v_1, \dots, v_i, w_{i+1}, w_{i+2}, \dots, w_n)$$

e quindi, per induzione, che $\text{Span}(v_1, \dots, v_n) = \text{Span}(w_1, \dots, w_n)$

- Se per assurdo si avesse che $k > n$, allora

$$v_{n+1} \in \text{Span}(w_1, \dots, w_n) = \text{Span}(v_1, \dots, v_n)$$

contraddicendo l'ipotesi che v_1, \dots, v_k siano indipendenti.

Corollary 20

Siano $v_1, \dots, v_n \in V$ e $w_1, \dots, w_m \in V$ due basi di V . In tal caso, si ha che $n = m$, ossia hanno la stessa **cardinalità**

Dimostrazione:

- Siccome sono entrambi basi, si ha che

$$\text{Span}(v_1, \dots, v_n) = V = \text{Span}(w_1, \dots, w_m)$$

- Di conseguenza, poiché i vettori $v_1, \dots, v_n \in V = \text{Span}(w_1, \dots, w_m)$ sono linearmente indipendenti, allora $n \leq m$
- Analogamente, poiché i vettori $w_1, \dots, w_m \in V = \text{Span}(v_1, \dots, v_n)$ sono linearmente indipendenti, allora $m \leq n$
- Dunque, l'unica possibilità è che $n = m$

Definition 64. Dimensione di uno spazio vettoriale

Dato uno spazio vettoriale V su K , definiamo come **dimensione di V** ($\dim(V)$) la cardinalità di una sua base

Esempio:

- Data la base canonica di K^n , ossia e_1, \dots, e_n , si ha che:

$$\dim(K^n) = n$$

Observation 43

I vettori $v_1, \dots, v_n \in V$ sono una base di V se e solo se

$$\forall v \in V, \exists! \lambda_1, \dots, \lambda_n \mid v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$$

Inoltre, chiamiamo tali unici scalari come **coordinate di v in tale base**

Dimostrazione:

- Se $v_1, \dots, v_n \in V$ sono una base di V , in quanto generatori di V si ha che ogni vettore $v \in V$ può essere espresso come una combinazione lineare di v_1, \dots, v_n .
- Supponiamo ora che esistano due combinazioni lineari tali che

$$\mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n = v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$$

- In tal caso si ha che

$$\begin{aligned} \mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n &\implies \mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n - \lambda_1 v_1 - \dots - \lambda_n v_n = 0_V \implies \\ &\implies (\lambda_1 - \mu_1) v_1 + \dots + (\lambda_n - \mu_n) v_n = 0_V \end{aligned}$$

- Poiché v_1, \dots, v_n sono linearmente indipendenti, si ha che:

$$(\lambda_1 - \mu_1) v_1 + \dots + (\lambda_n - \mu_n) v_n = 0_V \iff (\lambda_1 - \mu_1) = \dots = (\lambda_n - \mu_n) = 0$$

implicando quindi che

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

Observation 44

Diciamo che V ha dimensione infinita se non esiste un insieme finito di generatori

Esempi:

- Lo spazio vettoriale V definito su $K[x]$ non può avere base finita: dati $p_1(x), \dots, p_n(x) \in V$ e $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in K$ si ha che:

$$\deg(\lambda_1 p_1(x) + \dots + \lambda_n p_n(x)) \leq \max(\deg(p_1(x)), \dots, \deg(p_n(x)))$$

Infatti, in tale esempio la base è data dai monomi $1, x, x^2, \dots$

- Lo spazio vettoriale V definito su $K^S : \{f : S \rightarrow K\}$ ha dimensione finita se e solo se S ha cardinalità finita

8.2 Trasformazioni lineari

Definition 65. Trasformazione lineare

Dati due spazi vettoriali V e W definiti sullo stesso campo K , la funzione $f : V \rightarrow W$ viene detta **trasformazione lineare** (o morfismo tra spazi vettoriali) se:

- $\forall v, v' \in V, f(v + v') = f(v) + f(v')$
- $\forall \lambda \in K, v \in V, f(\lambda v) = \lambda f(v)$

Theorem 57

Dato uno spazio vettoriale V si ha che:

$$\dim(V) = n \implies V \cong K^n$$

Dimostrazione:

- Siano v_1, \dots, v_n una base di V (dunque $\dim(V) = n$). Definiamo la funzione

$$f : K^n \rightarrow V : (t_1, \dots, t_n) \mapsto (t_1 v_1 + \dots + t_n v_n)$$

- Poiché $\forall v \in V, \exists! \lambda_1, \dots, \lambda_n \mid v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$, la funzione f è automaticamente biettiva:

$$\left. \begin{array}{l} v_1, \dots, v_n \text{ generatori di } V \implies f \text{ suriettiva} \\ v_1, \dots, v_n \text{ lin. indipendenti} \implies f \text{ iniettiva} \end{array} \right\} \implies f \text{ biettiva}$$

- Dati quindi $x = (x_1, \dots, x_n), y = (y_1, \dots, y_n) \in K^n$, si ha che:

$$f(x+y) = (x_1+y_1)v_1 + \dots + (x_n+y_n)v_n = x_1v_1 + \dots + x_nv_n + y_1v_1 + \dots + y_nv_n = f(x) + f(y)$$

- Dato invece $\lambda \in K$, si ha che:

$$f(\lambda v) = \lambda x_1 v_1 + \dots + \lambda x_n v_n = \lambda(x_1 v_1 + \dots + x_n v_n) = \lambda f(x)$$

- Dunque, concludiamo che f sia un isomorfismo, implicando che anche f^{-1} lo sia.

$$V \cong K^n$$

Theorem 58

Dati due spazi vettoriali V e W definiti sullo stesso K , si ha che:

$$V \cong W \iff \dim(V) = \dim(W)$$

Dimostrazione:

- $\dim(V) = \dim(W) \implies V \cong W$
 - Sappiamo già che $\dim(V) = \dim(W) = n \implies V \cong K^n \cong W$
- $V \cong W \implies \dim(V) = \dim(W)$
 - Supponiamo che $V \cong W$, dove f è l'isomorfismo, e sia v_1, \dots, v_n una base di V .
 - Siccome f è suriettiva si ha che $\forall w \in W, \exists v \in V \mid w = f(v)$, dunque si ha che
$$w = f(v) = f(\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n) = \lambda_1 f(v_1) + \dots + \lambda_n f(v_n) \in \text{Span}(f(v_1), \dots, f(v_n))$$

Dunque $f(v_1), \dots, f(v_n)$ sono generatori di W

- Siccome f è un morfismo, si ha che

$$f(0_V) = 0_W = \lambda_1 f(v_1) + \dots + \lambda_n f(v_n) = f(\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n)$$

- Siccome f è suriettiva, allora

$$f(0_V) = f(\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n) \iff 0_V = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$$

- Siccome v_1, \dots, v_n sono linearmente indipendenti, allora

$$0_V = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n \iff \lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0$$

implicando quindi che anche $f(v_1), \dots, f(v_n)$ siano linearmente indipendenti

$$0_W = \lambda_1 f(v_1) + \dots + \lambda_n f(v_n) \iff \lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0$$

- I vettori $f(v_1), \dots, f(v_n)$ sono quindi una base di W , la cui dimensione corrisponde a quella di V

Definition 66. Spazio quoziente

Dato uno spazio vettoriale V e un sottospazio $W \subseteq V$, lo **spazio quoziente** V/W è uno spazio vettoriale con la somma $[v] + [v'] = [v + v']$ e il prodotto con scalare $\lambda[x] = [\lambda x]$

Dimostrazione:

- La dimostrazione della ben definizione della somma è analoga a quella del normale gruppo quoziente
- Dimostriamo quindi che il prodotto con scalare sia ben definito

$$[v] = [v'] \implies v' - v \in W \implies \lambda(v' - v) = \lambda v' - \lambda v \in W \implies [\lambda v] = [\lambda v']$$

Theorem 59. Dimensione spazio quoziente

Dato uno spazio vettoriale V e un sottospazio $W \subseteq V$, si verifica che

$$\dim(V/W) = \dim(V) - \dim(W)$$

Dimostrazione:

- Sia w_1, \dots, w_k una base di W . Se $\dim(V) > k$ allora $\text{Span}(w_1, \dots, w_k) \subsetneq V$.
- Di conseguenza, esiste $v_{k+1} \in V \mid v_{k+1} \notin \text{Span}(w_1, \dots, w_k)$, implicando che w_1, \dots, w_k, v_{k+1} siano linearmente indipendenti
- A questo punto, se $\dim(V) > k+1$, allora esiste $v_{k+2} \in V \mid v_{k+2} \notin \text{Span}(w_1, \dots, w_k, v_{k+1})$, implicando che $w_1, \dots, w_k, v_{k+1}, v_{k+2}$ siano linearmente indipendenti
- Ripetendo tale procedimento $n - k = \dim(V) - \dim(W)$ volte arriviamo a costruire una base di V della forma $w_1, \dots, w_k, v_{k+1}, \dots, v_n$
- Dato $v \in \text{Span}(w_1, \dots, w_k, v_{k+1}, \dots, v_n)$, si ha che:

$$\begin{aligned} v &= \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_k w_k + \lambda_{k+1} v_{k+1} + \dots + \lambda_n v_n \implies \\ \implies [v] &= \lambda_1 [w_1] + \dots + \lambda_k [w_k] + \lambda_{k+1} [v_{k+1}] + \dots + \lambda_n [v_n] \end{aligned}$$

- Notiamo come

$$\begin{aligned} w_1, \dots, w_k \in W &\implies 0_V - w_1, \dots, 0_V - w_k \in W \implies \\ \implies w_1 \sim 0_V, \dots, w_k \sim 0_V &\implies [0_V] = [w_1] = \dots = [w_k] \end{aligned}$$

- Di conseguenza, si ha che $[v_{k+1}], \dots, [v_n]$ sono generatori di V/K

$$\begin{aligned} [v] &= \lambda_1 [w_1] + \dots + \lambda_k [w_k] + \lambda_{k+1} [v_{k+1}] + \dots + \lambda_n [v_n] \implies \\ \implies [v] &= \lambda_1 [0_V] + \dots + \lambda_k [0_V] + \lambda_{k+1} [v_{k+1}] + \dots + \lambda_n [v_n] = \lambda_{k+1} [v_{k+1}] + \dots + \lambda_n [v_n] \end{aligned}$$

- Supponiamo quindi $[0_V] \in V/W$ possa essere scritto come una combinazione lineare di V/W :

$$\begin{aligned} [0_V] &= \lambda_{k+1} [v_{k+1}] + \dots + \lambda_n [v_n] \implies \\ \implies [0_V] &= [\lambda_{k+1} v_{k+1} + \dots + \lambda_n v_n] \implies \end{aligned}$$

- Poiché $\lambda_{k+1} v_{k+1} + \dots + \lambda_n v_n \in W$, si ha che

$$\begin{aligned} \lambda_{k+1} v_{k+1} + \dots + \lambda_n v_n &= \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_k w_k \implies \\ \lambda_{k+1} v_{k+1} + \dots + \lambda_n v_n - \lambda_1 w_1 - \dots - \lambda_k w_k &= 0_V \end{aligned}$$

- Poiché $w_1, \dots, w_k, v_{k+1}, \dots, v_n$ sono linearmente indipendenti, allora

$$\lambda_{k+1} v_{k+1} + \dots + \lambda_n v_n - \lambda_1 w_1 - \dots - \lambda_k w_k = 0_V \iff \lambda_1 = \dots = \lambda_k = \lambda_{k+1} = \dots = \lambda_n = 0$$

implicando quindi che anche $\lambda_{k+1} v_{k+1} + \dots + \lambda_n v_n$ siano linearmente indipendenti, rendendoli una base di V/W , la cui dimensione è $n - k = \dim(V) - \dim(W)$

8.2.1 Teorema del Rango e Formula di Grassman

Proposition 60

Dati due spazi vettoriali V e W e una trasformazione lineare $f : V \rightarrow W$, il nucleo $Ker(f) \subseteq V$ e l'immagine $Im(f) \subseteq W$ di f sono definiti come

$$Ker(f) : \{v \in V \mid f(v) = 0_W\}$$

$$Im(f) : \{w \in W \mid w = f(v), \exists v \in V\}$$

I quali sono entrambi sottospazi vettoriali, rispettivamente di V e W

Dimostrazione:

- Sappiamo già che essi sono sottogruppi per la somma
- Verifichiamo quindi che siano chiusi nel prodotto con scalare

$$v \in Ker(f), \lambda \in K \implies f(\lambda v) = \lambda f(v) = \lambda 0_W = 0_W \implies \lambda v \in Ker(f)$$

$$w = f(v) \in Im(f), \lambda \in K \implies \lambda w = \lambda f(v) = f(\lambda v) \implies \lambda w \in Im(f)$$

Observation 45. Teorema fondamentale di isomorfismo

Data una trasformazione lineare $f : V \rightarrow W$, si ha che

$$V/Ker(f) \cong Im(f)$$

Implicando anche che $\dim(V/Ker(f)) = \dim(Im(f))$

Theorem 61. Teorema del Rango

Data una trasformazione lineare $f : V \rightarrow W$, definiamo come **rango di f** la dimensione della sua immagine:

$$rk(f) := \dim(Im(f)) = \dim(V/Ker(f)) = \dim(V) - \dim(Ker(f))$$

Proposition 62

Sia $\dim(W) = n$. Si verifica che:

1. Dati $w_1, \dots, w_k \in W$ linearmente indipendenti, dove $k < n$, allora $\exists w_{k+1}, \dots, w_n \mid w_1, \dots, w_n$ è base (estensione ad una base)
2. Dati $w_1, \dots, w_m \in W$ generatori, dove $m \geq n$, allora $\exists 1 \leq i_1, \dots, i_n \leq m \mid w_{i_1}, \dots, w_{i_n}$ sono una base di W (riduzione ad una base)
3. Dati $w_1, \dots, w_n \in W$, siccome $\dim(W) = n$, allora w_1, \dots, w_n sono linearmente indipendenti se e solo se sono anche generatori

Dimostrazioni:

1.
 - Poiché $k < n$, allora $\exists w_{k+1} \in W \mid w_{k+1} \notin \text{Span}(w_1, \dots, w_k)$, implicando che w_1, \dots, w_{k+1} siano linearmente indipendenti.
 - Analogamente, possiamo ripetere tale procedimento $n - k$ volte, estendendo tale insieme linearmente indipendente fino a che $\text{Span}(w_1, \dots, w_n) = W$, ossia fino a che diventino anche generatori e quindi una base
 - Notiamo come non potremmo ripetere tale procedimento $n - k + 1$ volte, poiché $w_{n+1} \in W = \text{Span}(w_1, \dots, w_n) \implies w_1, \dots, w_n, w_{n+1}$ non linearmente indipendenti

2.
 - Poiché w_1, \dots, w_m sono generatori, possiamo assumere che $\exists w_{i_1} \neq 0$ tra di essi, il quale è (ovviamente) linearmente indipendente con se stesso
 - Siccome $\text{Span}(w_{i_1}) \subsetneq W = \text{Span}(w_1, \dots, w_m)$, allora $\exists w_{i_2} \mid w_{i_2} \notin \text{Span}(w_{i_1})$, implicando che w_{i_1}, w_{i_2} siano linearmente indipendenti
 - Ripetendo tale procedimento n volte fino a che $\text{Span}(w_{i_1}, \dots, w_{i_n}) = W = \text{Span}(w_1, \dots, w_m)$, ossia fino a che diventino anche generatori e quindi una base
 - Notiamo come non potremmo ripetere tale procedimento $n + 1$ volte, poiché $w_{i_{n+1}} \in W = \text{Span}(w_{i_1}, \dots, w_{i_n}) \implies w_{i_1}, \dots, w_{i_n}, w_{i_{n+1}}$ non linearmente indipendenti

3.
 - w_1, \dots, w_n linearmente indipendenti \implies generatori
 - Supponiamo per assurdo che w_1, \dots, w_n siano linearmente indipendenti ma non generatori, dunque che $\text{Span}(w_1, \dots, w_n) \subsetneq W$
 - Di conseguenza, si ha che $\exists w_{n+1} \in W \mid w_{n+1} \notin \text{Span}(w_1, \dots, w_n)$, implicando che w_1, \dots, w_{n+1} siano linearmente indipendenti
 - Tuttavia, come visto nella prima osservazione, sappiamo che se $\dim(W) = n$, allora w_1, \dots, w_{n+1} non possono essere linearmente indipendenti
 - w_1, \dots, w_n generatori \implies linearmente indipendenti
 - Supponiamo per assurdo che w_1, \dots, w_n siano generatori ma non linearmente indipendenti, dunque che

$$\lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_n w_n = 0_W, \exists j \in [1, n] \mid \lambda_j \neq 0 \implies$$

$$\begin{aligned} \implies w_j &= -\lambda_j^{-1} \lambda_1 w_1 - \dots - \lambda_j^{-1} \lambda_n w_n \implies w \in \text{Span}(w_1, \dots, \hat{w}_j, \dots, w_n) \implies \\ &\implies \text{Span}(w_1, \dots, w_n) = W \subseteq \text{Span}(w_1, \dots, \hat{w}_j, \dots, w_n) \end{aligned}$$

dove \hat{w} indica che tale elemento è escluso

- Inoltre, per definizione stessa, sappiamo che

$$\text{Span}(w_1, \dots, \hat{w}_j, \dots, w_n) \subseteq \text{Span}(w_1, \dots, w_n) = W$$

dunque concludiamo che

$$\text{Span}(w_1, \dots, \hat{w}_j, \dots, w_n) = W = \text{Span}(w_1, \dots, w_n)$$

- Tuttavia, $\dim(W) = n$ è impossibile che W possa avere una base di dimensione $n - 1$

Theorem 63. Formula di Grassmann

Sia W uno spazio vettoriale su K e siano $U, V \subseteq W$ due sottospazi. Esistono due sottospazi di W , ossia:

$$U + V : \{u + v \mid u \in U, v \in V\}$$

$$U \cap V : \{w \mid w \in U \wedge w \in V\}$$

da cui si ha che:

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

Dimostrazione:

- Posti $k := \dim(U \cap V)$, $m := \dim(U)$, $n := \dim(V)$, siano:

- w_1, \dots, w_k una base di $U \cap V$
- $B_1 := w_1, \dots, w_k, u_{k+1}, \dots, u_m$ una base di U
- $B_2 := w_1, \dots, w_k, v_{k+1}, \dots, v_n$ una base di V

- Consideriamo quindi il seguente insieme di vettori:

$$B_1 \cup B_2 = w_1, \dots, w_k, u_{k+1}, \dots, u_m, v_{k+1}, \dots, v_n$$

- Consideriamo ora $u \in \text{Span}(B_1) = U$ e $v \in \text{Span}(B_2)$, dunque

$$u = \sum_{i=1}^k \lambda_i w_i + \sum_{j=k+1}^m \lambda_j u_j \quad v = \sum_{i=1}^k \lambda_i w_i + \sum_{j=k+1}^n \lambda_j v_j$$

- Dunque $\forall u \in U, v \in V$ si ha che :

$$\begin{aligned} u + v &= \sum_{i=1}^k \lambda_i w_i + \sum_{j=k+1}^m \lambda_j u_j + \sum_{i=1}^k \mu_i w_i + \sum_{j=k+1}^n \mu_j v_j \implies \\ \implies u + v &= \sum_{i=1}^k (\lambda_i + \mu_i) w_i + \sum_{j=k+1}^m \lambda_j u_j + \sum_{j=k+1}^n \mu_j v_j \implies \implies u + v \in \text{Span}(B_1 \cup B_2) \end{aligned}$$

- Dunque, si ha che $B_1 \cup B_2$ sono generatori di $U + V$

- Consideriamo quindi $0_W \in U + V$ scritto come combinazione lineare di tale base

$$\sum_{i=1}^k \beta_i w_i + \sum_{j=k+1}^m \gamma_j u_j + \sum_{h=k+1}^n \eta_h v_h = 0_W$$

- A questo punto, poniamo:

$$a := \sum_{i=1}^k \beta_i w_i \quad b := \sum_{j=k+1}^m \gamma_j u_j \quad c := \sum_{h=k+1}^n \eta_h v_h$$

dunque si ha che:

$$a + b + c = 0_W \implies b = -a - c = -(a + c)$$

- Siccome $b \in \text{Span}(u_{k+1}, \dots, u_m) \subsetneq U \implies b \in U$ e $-(a + c) \in \text{Span}(B_2) = V$, allora (poiché $b = -(a + c)$) ne segue che $b \in U \cap V$
- Di conseguenza, possiamo riscrivere b anche come una combinazione lineare della base di $U \cap V$, ossia w_1, \dots, w_k :

$$\sum_{j=k+1}^m \gamma_j u_j = b = \sum_{t=0}^k \alpha_t w_t \implies \sum_{j=k+1}^m \gamma_j u_j - \sum_{t=0}^k \alpha_t w_t = 0_W$$

- Poiché u_{k+1}, \dots, u_m e w_1, \dots, w_k sono entrambi insiemi linearmente indipendenti, allora ne segue che

$$\sum_{j=k+1}^m \gamma_j u_j - \sum_{t=0}^k \alpha_t w_t = 0_W \iff \gamma_{k+1} = \dots = \gamma_m = \alpha_1 = \dots = \alpha_k = 0$$

e dunque che $w_1, \dots, w_k, u_{k+1}, \dots, u_m$ siano anch'essi linearmente indipendenti, implicando quindi che

$$a + b + c = 0_W \iff a + c = 0_W$$

poiché $\gamma_{k+1} = \dots = \gamma_m = 0$

- Analogamente, ponendo $c = -(a+b)$, arriviamo a dimostrare che $w_1, \dots, w_k, v_{k+1}, \dots, v_n$ siano anch'essi linearmente indipendenti, implicando quindi che

$$a + c = 0_W \iff a = 0_W$$

poiché $\eta_{k+1} = \dots = \eta_n = 0$

- Infine, sappiamo già che w_1, \dots, w_k sono linearmente indipendenti, poiché sono una base di $U \cap V$, implicando quindi che $\beta_1 = \dots = \beta_k = 0$, e di conseguenza che

$$a + b + c = 0_W \iff \beta_1 = \dots = \beta_k = \gamma_{k+1} = \dots = \gamma_m = \eta_{k+1} = \dots = \eta_n = 0$$

e dunque che i generatori di $U + V$ siano anche linearmente indipendenti e quindi che siano una base

- Infine, concludiamo affermando che la base di $U + V$ abbia dimensione pari a:

$$\dim(U + V) = k + (m - k) + (n - k) = m + n - k = \dim(U) + \dim(V) - \dim(U \cap V)$$

8.3 Spazi affini, Sottospazi affini e Giacitura

Definition 67. Spazio affine

Dato uno spazio vettoriale V , definiamo come **spazio affine** A la struttura algebrica dotata della funzione:

$$f : A \times V \rightarrow A : (P, v) \rightarrow a + v$$

tale che:

- $\forall P \in A$ fissato, la funzione associa il punto $P + v$ al vettore $v \in V$, creando una biezione $g : V \rightarrow A$
- $\forall P \in A, \forall v, w \in V$ si ha che:

$$(P + v) + w = P + (v + w)$$

Definition 68. Sottospazio affine

Dato uno spazio vettoriale V , un suo sottospazio vettoriale W e un vettore $v \in V$, definiamo come **sottospazio affine** il sottospazio di V generato da:

$$S = v + W : \{v + w \mid w \in W\}$$

In altre parole, si tratta del sottospazio W traslato dal vettore v . Ogni sottospazio affine può essere visto come una **classe laterale di un sottospazio** (poiché l'operazione primaria degli spazi vettoriali è $+$)

Definition 69. Giacitura

Dato uno spazio vettoriale V ed un suo sottospazio affine $S \subset V$, definiamo come **giacitura di S** , indicata con $Giac(S)$, il sottospazio vettoriale associato a S , ossia il sottospazio vettoriale tale che:

$$S = v + Giac(S)$$

dove $v \in V$.

In altre parole, la giacitura è il sottospazio generante le sue stesse classi laterali su V .

Inoltre, si ha che $\dim(S) = \dim(Giac(S))$

8.4 Prodotto scalare

Definition 70. Prodotto scalare

Il **prodotto scalare** tra due vettori corrisponde all'operazione binaria

$$\cdot : K^n \times K^n \rightarrow K : (v, v') \mapsto \eta$$

In particolare, dati due vettori $v = (\lambda_1, \dots, \lambda_n), v' = (\mu_1, \dots, \mu_n) \in K^n$, il prodotto scalare tra di essi è definito come:

$$v \cdot v' = \sum_{i=1}^n \lambda_i \mu_i$$

Observation 46

Il prodotto scalare gode delle seguenti proprietà:

- $u, v \in K^n \implies u \cdot v = v \cdot u$
- $u, v, w \in K^n \implies u(v + w) = uv + uw$
- $u, v \in K^n, \lambda \in K \implies u(\lambda v) = \lambda uv$

Definition 71. Norma di un vettore

Dato $v \in \mathbb{R}^n$, definiamo la **norma (o lunghezza)** di tale vettore come

$$\|v\| := \sqrt{v \cdot v} = \sqrt{x_1 \cdot x_1 + \dots + x_n \cdot x_n} = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}$$

Observation 47

Dati $u, v \in \mathbb{R}^n$ e l'angolo $0 < \theta < \pi$ interno tra u e v , si ha che

$$\cos \theta = \frac{uv}{\|u\| \|v\|}$$

e in particolare che:

- $\theta < \frac{\pi}{2} \iff uv > 0$
- $\theta = \frac{\pi}{2} \iff uv = 0$
- $\theta > \frac{\pi}{2} \iff uv < 0$

Dimostrazione:

- Tramite il [Teorema del Coseno](#) (normalmente utilizzato per calcolare la lunghezza di un lato di un triangolo qualsiasi sapendo la lunghezza degli altri due lati), nel caso dei vettori si ha che:

$$\|v - u\|^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2 - 2 \|u\| \|v\| \cos \theta \implies$$

$$\implies \|v - u\|^2 - \|u\|^2 - \|v\|^2 = -2 \|u\| \|v\| \cos \theta \implies$$

$$\implies \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 - \sum_{j=1}^n x_j^2 - \sum_{k=1}^n y_k^2 = -2 \|u\| \|v\| \cos \theta \implies$$

$$\implies \sum_{i=1}^n (y_i^2 - 2y_i x_i + x_i^2) - \sum_{j=1}^n x_j^2 - \sum_{k=1}^n y_k^2 = -2 \|u\| \|v\| \cos \theta \implies$$

$$\implies \sum_{i=1}^n y_i^2 - 2 \sum_{h=1}^n y_h x_h + \sum_{t=1}^n x_t^2 - \sum_{j=1}^n x_j^2 - \sum_{k=1}^n y_k^2 = -2 \|u\| \|v\| \cos \theta \implies$$

$$\implies \sum_{h=1}^n y_h x_h = \|u\| \|v\| \cos \theta \implies \sum_{h=1}^n y_h x_h = \|u\| \|v\| \cos \theta \implies$$

$$\implies uv = \|u\| \|v\| \cos \theta \implies \frac{uv}{\|u\| \|v\|} = \cos \theta$$

Capitolo 9

Matrici

Definition 72. Matrici

Dati $m, n \neq 0 \in \mathbb{N}$, una **matrice** $m \times n$ a coefficienti in un campo K è una griglia con m righe e n colonne, le cui entrate sono elementi in K

$$A \in \text{Mat}_{m \times n}(K) \implies A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}$$

Esempio:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix} \in \text{Mat}_{2 \times 3}(\mathbb{R})$$

Definition 73. Vettori colonna e Vettori riga

Definiamo una matrice $1 \times n$ come **vettore riga**

$$\begin{pmatrix} a_1 & \cdots & a_n \end{pmatrix} \in \text{Mat}_{1 \times n}(K)$$

e analogamente definiamo una matrice $m \times 1$ come **vettore colonna**

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} \in \text{Mat}_{m \times 1}(K)$$

Observation 48

Una matrice $m \times n$ può essere definita come un **vettore di m vettori riga aventi n elementi** (che vengono indicati con un pedice)

$$A_1, \dots, A_n \in K^m \implies A = \begin{pmatrix} A_1 & \cdots & A_n \end{pmatrix}$$

o come un **vettore di n vettori colonna aventi m elementi** (che vengono indicati con un apice)

$$A^1, \dots, A^m \in K^n \implies A = \begin{pmatrix} A^1 \\ \vdots \\ A^m \end{pmatrix}$$

Observation 49

Una matrice $m \times n$ è uno spazio vettoriale di dimensione $m \cdot n$

$$\dim(Mat_{m \times n}(K)) = m \cdot n$$

Esempi:

- Siano $A, B \in Mat_{m \times n}(K)$ e sia $\lambda \in K$. Si verifica che:

$$A + B = \begin{pmatrix} a_{1,1} + b_{1,1} & \cdots & a_{1,n} + b_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} + b_{m,1} & \cdots & a_{m,n} + b_{m,n} \end{pmatrix}$$

$$\lambda A = \begin{pmatrix} \lambda a_{1,1} & \cdots & \lambda a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda a_{m,1} & \cdots & \lambda a_{m,n} \end{pmatrix}$$

- La base canonica di una matrice 2×2 è la cui base canonica è

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

9.1 Prodotto tra matrici

Definition 74. Prodotto tra matrici

Siano $A \in \text{Mat}_{h \times m}(K)$, $B \in \text{Mat}_{m \times n}(K)$. Siano quindi $A_1, \dots, A_h \in K^m$ i vettori riga di A e siano $B^1, \dots, B^n \in K^m$ i vettori colonna di B .

Il **prodotto tra matrici** è l'operazione binaria

$$\cdot : \text{Mat}_{h \times m}(K) \times \text{Mat}_{m \times n}(K) \rightarrow \text{Mat}_{h \times n}(K) : (A, B) \mapsto AB$$

Il prodotto AB è una matrice appartenente a $\text{Mat}_{h \times n}(K)$ (dunque avente la stessa quantità di righe di A e la stessa quantità di colonne di B) ed è definito come:

$$AB = \begin{pmatrix} A_1 B^1 & \cdots & A_1 B^n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_h B^1 & \cdots & A_h B^n \end{pmatrix}$$

Attenzione: affinché il prodotto ben definito è necessario che la quantità di colonne di A sia uguale alla quantità di righe di B

Esempi:

- $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 5 + 2 \cdot 7 & 1 \cdot 6 + 2 \cdot 8 \\ 3 \cdot 5 + 4 \cdot 7 & 3 \cdot 6 + 4 \cdot 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 19 & 22 \\ 43 & 50 \end{pmatrix}$
- $\begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \cdot 1 + 6 \cdot 3 & 5 \cdot 2 + 6 \cdot 4 \\ 7 \cdot 1 + 8 \cdot 3 & 7 \cdot 2 + 8 \cdot 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 23 & 34 \\ 32 & 46 \end{pmatrix}$
- $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 6 & 7 \\ -2 & 0 & 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 3 + 2 \cdot (-2) & 1 \cdot 6 + 2 \cdot 0 & 1 \cdot 7 + 2 \cdot 8 \\ 4 \cdot 3 + 5 \cdot (-2) & 4 \cdot 6 + 5 \cdot 0 & 4 \cdot 7 + 5 \cdot 8 \end{pmatrix} =$
 $= \begin{pmatrix} -1 & 6 & 23 \\ 2 & 24 & 68 \end{pmatrix}$
- $\begin{pmatrix} 3 & 6 & 7 \\ -2 & 0 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 5 \end{pmatrix} = \nexists$ poiché la quantità di colonne nella prima non corrisponde a quella delle righe della seconda

Observation 50

Date tre matrici A, B, C ed uno scalare λ , se i prodotti sono ben definiti si ha che:

- $(AB)C = ABC = A(BC)$
- $A(B + C) = AB + AC$
- $(A + B)C = AC + BC$
- $\lambda(AB) = (\lambda A)B = A(\lambda B)$

Corollary 21

Uno spazio vettoriale $Mat_{n \times n}(K)$ (anche detto spazio delle matrici quadrate di ordine n) è un **anello non commutativo**, dove l'elemento neutro è:

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

9.2 Rango di una matrice

Definition 75. Sottospazio ortogonale

Sia $V \subseteq K^n$ un sottospazio. Definiamo il **sottospazio ortogonale** $V^\perp \subseteq K^n$ come

$$V^\perp = \{w \in K^n \mid wv = 0, \forall v \in V\}$$

dove

$$\dim(V^\perp) = \dim(K^n) - \dim(V) = n - \dim(V)$$

Definition 76. Rango di una matrice

Data una matrice $A \in Mat_{m \times n}(K)$, definiamo la trasformazione lineare del **prodotto sinistro dei vettori colonna**

$$L_A : K^n \rightarrow K^m : x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \rightarrow Ax$$

Definiamo il **rango della matrice** A come:

$$rk(A) := rk(L_A) = \dim(\text{Span}(A^1, \dots, A^n)) = \dim(\text{Span}(A_m, \dots, A_m))$$

Dimostrazione:

- Analizziamo meglio il comportamento di tale funzione:

$$L_A(x) = Ax = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1}x_1 + \cdots + a_{1,n}x_n \\ \vdots \\ a_{m,1}x_1 + \cdots + a_{m,n}x_n \end{pmatrix}$$

da cui traiamo che

$$\begin{aligned} \text{Ker}(L_A) &= \{x \in K^n \mid L_A(x) = Ax = 0_{K^m}\} = \\ &= \left\{ x \in K^n \mid \begin{pmatrix} xA_1 \\ \vdots \\ xA_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \right\} = \text{Span}(A_1, \dots, A_m)^\perp \end{aligned}$$

ossia che $\text{Ker}(L_A)$ contiene tutte i vettori $x = (x_1, \dots, x_n) \in K^n$ che sono soluzione del seguente sistema:

$$\begin{cases} a_{1,1}x_1 + \dots + a_{1,n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{m,1}x_1 + \dots + a_{m,n}x_n = 0 \end{cases}$$

- Tuttavia, possiamo anche riscrivere tale prodotto come una combinazione lineare dei vettori colonna di A (ossia A^1, \dots, A^n)

$$\begin{aligned} Ax &= \begin{pmatrix} a_{1,1}x_1 + \dots + a_{1,n}x_n \\ \vdots \\ a_{m,1}x_1 + \dots + a_{m,n}x_n \end{pmatrix} = x_1 \begin{pmatrix} a_{1,1} \\ \vdots \\ a_{m,1} \end{pmatrix} + \dots + x_n \begin{pmatrix} a_{1,n} \\ \vdots \\ a_{m,n} \end{pmatrix} = \\ &= x_1 A^1 + \dots + x_n A^n \implies Ax \in \text{Span}(A^1, \dots, A^n) \end{aligned}$$

e quindi abbiamo che $\text{Im}(L_A) = \text{Span}(A^1, \dots, A^n)$

- Il rango della matrice corrisponderà a:

$$\begin{aligned} rk(A) &:= rk(L_A) = \dim(\text{Span}(A^1, \dots, A^n)) = \dim(\text{Im}(L_A)) = \\ &= \dim(K^n) - \dim(\text{Ker}(L_A)) = n - \dim(\text{Ker}(L_A)) = \\ &= n - \dim(\text{Span}(A_1, \dots, A_n)^\perp) = \dim(\text{Span}(A_1, \dots, A_m)) \end{aligned}$$

Definition 77. Operazioni elementari su matrici

Possiamo effettuare tre tipi di **operazioni elementari** sulle righe o sulle colonne di $A \in \text{Mat}_{m \times n}(K)$:

1. Scambiare due righe (o colonne) tra di loro
2. Moltiplicare una riga (o colonna) per $\lambda \in K^*$
3. Sommare ad una riga (o colonna) un multiplo di un'altra riga (o colonna)

Nessuna di tali operazioni altera $\text{Ker}(L_A)$, mentre $\text{Im}(L_A)$ viene potenzialmente modificata, tuttavia mantenendo la stessa dimensione e di conseguenza lo stesso **rango della matrice**, poiché $\dim(\text{Im}(L_A)) = \dim(K^n) - \dim(\text{Ker}(L_A))$ e la dimensione di $\text{Ker}(L_A)$ e di K^n rimangono invariate.

Corollary 22

Diciamo che due matrici $A, B \in Mat_{m \times n}(K)$ sono uguali se è possibile l'una partendo dall'altra utilizzando solo operazioni elementari

Proposition 64

Se A e B sono equivalenti solo per righe, allora $Ker(L_A) = Ker(L_B)$ e $Im(L_A) \neq Im(L_B)$.

Se A e B sono equivalenti solo per colonne, allora $Im(L_A) = Im(L_B)$ e $Ker(L_A) \neq Ker(L_B)$.

In entrambi i casi si verifica che $rk(A) = rk(B)$

Observation 51

Data $A \in Mat_{m \times n}(K)$, si ha che:

$$0 \leq rk(A) \leq \min(m, n)$$

9.2.1 Riduzione a scala di una matrice**Definition 78. Matrice a scala**

Definiamo come **pivot** di una riga di una matrice il primo elemento non nullo a partire da sinistra di tale riga.

Una matrice $A \in Mat_{m \times n}(K)$ viene detta **matrice a scala** se $\forall i \in [1, m]$ si verifica che il pivot della riga A_i è più a sinistra pivot della riga A_{i+1}

Esempi:

- Le seguenti matrici sono a scala, i cui pivot sono cerchiati:

$$\begin{pmatrix} \textcircled{1} & 0 & 2 & 0 & -1 \\ 0 & \textcircled{1} & 0 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & \textcircled{1} & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & \textcircled{1} & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & \textcircled{5} & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \textcircled{7} \end{pmatrix}$$

- Le seguenti matrici non sono a scala:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 3 & 3 \\ 0 & 9 & 2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 2 & 6 \\ 0 & 0 & 3 \\ 8 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Method 5. Algoritmo di Gauss-Jordan

Ogni matrice $A \in Mat_{n \times m}(K)$ può essere ridotta ad una **matrice a scala** $S \in Mat_{n \times m}(K)$ tramite il seguente algoritmo:

1. Sia A^j , dove $j \in [1, n]$ la prima colonna a partire da sinistra non nulla, ossia $\exists i[1, n] \mid c := a_{i,j} \neq 0$
2. Se $c \notin A_1$, allora la i -esima riga contenente c viene scambiata con A_1
3. Per $k = 2, \dots, m$, sottraiamo λA_1 alla riga A_k , dove λ è uno scalare scelto apposta in modo da annullare l' i -esimo elemento della
4. Se la matrice risultante non è ancora ridotta a scala, allora viene ripetuto ricorsivamente l'algoritmo su A_2 , ignorando le prime i colonne, e così via

Theorem 65

Data una matrice $A \in Mat_{m \times n}(K)$ e la sua versione ridotta a scala S , se S^{j_1}, \dots, S^{j_h} sono le colonne contenenti i pivot della scal, allora A^{j_1}, \dots, A^{j_h} sono una base di $Span(A^1, \dots, A^n)$, implicando che $h = rk(S) = rk(A)$

Esempio:

- Consideriamo il seguente sistema:

$$\begin{cases} x + 2y + 3z = 0 \\ 4x + 5y + 6z = 0 \\ 7x + 8y + 9z = 0 \end{cases}$$

- Tale sistema corrisponde fedelmente alla seguente matrice, dove A_1, \dots, A_m sono le righe:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

- Sottraiamo $-4A_1$ ad A_2 e $-7A_1$ ad A_3 :

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -3 & -6 \\ 0 & -6 & -12 \end{pmatrix}$$

- Sommiamo $-2A_2$ ad A_3 :

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

- La matrice ottenuta risulta essere a scala:

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

dove abbiamo che $rk(A) = 2$, mentre S^1 e S^2 sono una base di $Span(A^1, A^2, A^3)$

- Possiamo ridurre ancora tale matrice, moltiplicando prima A_2 per $-\frac{1}{3}$ per poi sommare $-2A_2$ a A_1 , mantenendo la forma a scala

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

- Otteniamo quindi che il sistema di partenza è equivalente al seguente:

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

- Risolvendo tale sistema in funzione di una variabile ausiliaria t , otteniamo che:

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

dunque il vettore v è base di $Ker(L_A)$

9.3 Teorema di Rouché-Capelli

Definition 79. Matrice completa

Dato un sistema di equazioni lineari (dette **equazioni cartesiane**) nella forma

$$\begin{cases} a_{1,1}x_1 + \dots + a_{1,n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{m,1}x_1 + \dots + a_{m,n}x_n = b_m \end{cases}$$

individuiamo una **matrice di coefficienti** ed un **vettore delle incognite**:

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

le quali corrispondono fedelmente alla seguente **matrice completa**:

$$A_b = \left(\begin{array}{ccc|c} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} & b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} & b_m \end{array} \right)$$

Theorem 66. Teorema di Rouché-Capelli

Data una matrice di coefficienti $A \in \text{Mat}_{m \times n}(K)$ e un vettore di coefficienti $b \in K^m$, il sistema $Ax = B$ **ammette soluzioni** se e solo se $\text{rk}(A) = \text{rk}(A_b)$, dove A_b è la matrice completa associata al sistema.

L'**insieme delle soluzioni** (se esistenti) è un **sottospazio affine** di K^n di dimensione $n - \text{rk}(A)$.

Se $n - \text{rk}(A) = 0$, allora esiste un'unica soluzione e il sistema viene detto **determinato**, altrimenti ne esistono infinite ed esso viene detto **indeterminato**.

Dimostrazione:

- Dato il sistema $Ax = b$, si verifica che:

$$\begin{aligned} \exists x \in K^n \mid Ax = b &\iff \exists x_1, \dots, x_n \in K \mid x_1 A^1 + \dots + x_n A^n = b \iff \\ &\iff b \in \text{Span}(A^1, \dots, A^n) \iff \text{Span}(A^1, \dots, A^n) = \text{Span}(A^1, \dots, A^n, b) \iff \\ &\iff \text{rk}(A) = \text{rk}(A_b) \end{aligned}$$

- Inoltre, da ciò deduciamo che $W \subseteq V$ e che $W = V \iff \dim(W) = \dim(V)$
- Verifichiamo ora la seconda parte del teorema: sia V l'insieme di soluzioni del sistema (ipotizzando che ne esista almeno una)

$$V = \{x \in K^n \mid Ax = b\}$$

- Consideriamo quindi il sottospazio $W \subseteq K^n$:

$$W = \{x \in K^n \mid Ax = 0\} = \text{Ker}(L_A)$$

- Considerato $x_0 \in V$, si ha che

$$x \in V \iff Ax = b = Ax_0 \iff A(x - x_0) = 0 \iff x - x_0 \in W \iff x \in x_0 + W$$

dove $x_0 + W$ è una classe laterale sinistra di W , dunque un suo sottospazio affine

Esempi:

1. Consideriamo il seguente sistema lineare:

$$\begin{cases} w + 2x + z = 1 \\ 2w + 4x + y = 3 \\ w + 2x + y - z = 2 \end{cases}$$

- La matrice completa corrispondente sarà:

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

- Sommiamo $-A_1$ a A_3 e $-2A_1$ a A_2 :

$$A_b = \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \end{array} \right)$$

- Sommiamo $-A_2$ a A_3 , ottenendo una matrice a scala, dove $rk(A) = rk(A_b) = 2$

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

- Il sistema di partenza quindi ammette infinite soluzioni ed è equivalente a:

$$\begin{aligned} & \begin{cases} w + 2x + z = 1 \\ y - 2z = 1 \end{cases} \implies \\ & \implies \begin{pmatrix} w \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 2x - z \\ x \\ 1 + 2z \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + x \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

2. Consideriamo il seguente sistema

$$\begin{cases} x + y + z = 1 \\ -x + y + 5z = 0 \\ 2y + 6z = 0 \end{cases}$$

- La matrice completa corrispondente sarà:

$$A_b = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 5 & 0 \\ 0 & 2 & 6 & 0 \end{array} \right)$$

- Sommiamo A_1 a A_2 :

$$A_b = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 6 & 1 \\ 0 & 2 & 6 & 0 \end{array} \right)$$

- Sommiamo $-A_2$ a A_3 , ottenendo una matrice a scala, dove $rk(A) \neq rk(A_b)$:

$$A_b = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

- Dunque, il sistema non ammette soluzioni

3. Consideriamo il seguente sistema:

$$\begin{cases} x + ky = 4 - k \\ kx + 4y = 4 \end{cases}$$

- La matrice completa corrispondente sarà:

$$A_b = \left(\begin{array}{cc|c} 1 & k & 4 - k \\ k & 4 & 4 \end{array} \right)$$

- Sommiamo $-kA_1$ a A_2 :

$$A_b = \left(\begin{array}{cc|c} 1 & k & 4 - k \\ 0 & 4 - k^2 & 4 - 2k + k^2 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 1 & k & 4 - k \\ 0 & 4 - k^2 & (2 - k)^2 \end{array} \right)$$

- A questo punto, a seconda del valore di k si verificano tre casi:
 - Se $k \neq \pm 2$, allora $4 - k^2 \neq 0$, dunque si ha che $rk(A) = rk(A_b) = 2$, implicando che il sistema ammetta un'unica soluzione, poiché il sottospazio affine generato avrebbe dimensione pari a 0.
 - Se $k = -2$, si ha che $rk(A) \neq rk(A_b)$, dunque il sistema non ammette soluzioni

- Se $k = 2$, si ha che $rk(A) = rk(A_b)$, allora la matrice equivale a

$$A_b = \left(\begin{array}{cc|c} 1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \implies \{x + 2y = 2\} \implies \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

dunque $rk(A) = rk(A_b) = 1$, implicando l'esistenza di infinite soluzioni

9.3.1 Equazioni parametriche

Definition 80. Equazioni parametriche

Sia V uno spazio vettoriale e W un suo sottospazio affine, dove $\dim(W) = d$, dunque $\exists x_0 \in V \mid W = x_0 + Giac(W)$.

Data g_1, \dots, g_d una base di $Giac(W)$, si verifica che:

$$\forall x \in W \implies \exists! t_1, \dots, t_d \in K \mid x = x_0 + t_1 g_1 + \dots + t_d g_d$$

definiamo l'insieme di tali equazioni come **equazioni parametriche** di W

Dimostrazione:

- Dato $x_0 \in V$ e data g_1, \dots, g_d una base di $Giac(W)$, si verifica che:

$$\begin{aligned} \forall x \in W &\implies x - x_0 \in Giac(W) \implies \\ \implies \exists! t_1, \dots, t_d \in K &\mid x - x_0 = t_1 g_1 + \dots + t_d g_d \\ \implies x &= x_0 + t_1 g_1 + \dots + t_d g_d \end{aligned}$$

Proposition 67

Dato uno spazio vettoriale V , un sistema $Ax = b$ e il sottospazio affine W delle soluzioni di quest'ultimo (se esistenti), espresso come l'insieme delle sue equazioni parametriche

$$W = \{x_0 + t_1 v_1 + \dots + t_d v_d \mid t_1, \dots, t_d \in K\}$$

dove $x_0 \in V$ e v_1, \dots, v_d sono base di $Giac(W)$, si verifica che:

$$x \in W \iff rk(v_1, \dots, v_d, x - x_0) = \dim(W)$$

Dimostrazione:

- Sia

$$W = \{x_0 + t_1 v_1 + \dots + t_d v_d \mid t_1, \dots, t_d \in K\}$$

dove $x_0 \in V$ e v_1, \dots, v_d sono base di $Giac(W)$, implicando quindi che:

$$\dim(W) = \dim(Giac(W)) = d$$

- In tal caso, si ha che:

$$\begin{aligned} x \in W &\iff x - x_0 \in \text{Giac}(W) = \text{Span}(v_1, \dots, v_d) \iff \\ &\iff \text{Span}(v_1, \dots, v_d) = \text{Span}(v_1, \dots, v_d, x - x_0) \iff \\ &\iff \text{rk}(v_1, \dots, v_d, x - x_0) = d = \dim(W) \end{aligned}$$

Esempio:

- Consideriamo il seguente insieme di equazioni parametriche corrispondenti ad un sottospazio affine in \mathbb{R}^3

$$V = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \mid t_1, t_2 \in \mathbb{R} \right\}$$

- Siccome $\dim(V) = 2$, si verifica che

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in V \iff \text{rk} \begin{pmatrix} 1 & 4 & x-1 \\ 2 & 5 & y \\ 3 & 6 & z+1 \end{pmatrix} = 2$$

- Effettuando la riduzione a scala di tale matrice, si ha che:

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} 1 & 4 & x-1 \\ 2 & 5 & y \\ 3 & 6 & z+1 \end{pmatrix} \xrightarrow{R_2 = -2R_1} \begin{pmatrix} 1 & 4 & x-1 \\ 0 & -3 & y-2x+2 \\ 3 & 6 & z+1 \end{pmatrix} \\ &\xrightarrow{R_3 = -3R_1} \begin{pmatrix} 1 & 4 & x-1 \\ 0 & -3 & y-2x+2 \\ 0 & -6 & z-3x+4 \end{pmatrix} \xrightarrow{R_3 = -2R_2} \begin{pmatrix} 1 & 4 & x-1 \\ 0 & -3 & y-2x+2 \\ 0 & 0 & z+x-2y \end{pmatrix} \end{aligned}$$

- Affinché la riduzione in scala abbia solo 2 pivot, è necessario che l'ultima riga della matrice contenga tutti zeri, implicando quindi che:

$$\text{rk}(A) = 2 \iff z + x - 2y = 0$$

- L'insieme di equazioni parametriche dato, quindi, equivale al seguente sistema di equazioni cartesiane:

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

corrispondente ad una retta in \mathbb{R}^3

9.4 Matrice di una trasformazione lineare

Theorem 68. Matrice di una trasformazione lineare

Sia $f : V \rightarrow W$ una trasformazione lineare.

Date $\mathcal{B} = v_1, \dots, v_n$ una base di V e $\mathcal{C} = w_1, \dots, w_m$ una base di W e i conseguenti due isomorfismi (sezione 8.2):

$$\varphi_{\mathcal{B}} : K^n \rightarrow V : (t_1, \dots, t_n) \mapsto (t_1 v_1 + \dots + t_n v_n)$$

$$\varphi_{\mathcal{C}} : K^m \rightarrow W : (h_1, \dots, h_m) \mapsto (h_1 w_1 + \dots + h_m w_m)$$

si verifica che:

$$\exists! A \in \text{Mat}_{m \times n}(K) \mid f = \varphi_{\mathcal{C}} \circ L_A \circ \varphi_{\mathcal{B}}^{-1}$$

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{f} & W \\ \varphi_{\mathcal{B}}^{-1} \downarrow & & \uparrow \varphi_{\mathcal{C}} \\ K^n & \xrightarrow{L_A} & K^m \end{array}$$

Definiamo tale matrice A come **la matrice di f nelle basi \mathcal{B} e \mathcal{C}**

Dimostrazione:

- Consideriamo la base canonica di K^n , ossia e_1, \dots, e_n . Si verifica che:

$$\varphi_{\mathcal{B}} : K^n \rightarrow V : e_i \mapsto v_i \implies \varphi_{\mathcal{B}}^{-1} : V \rightarrow K^n : v_i \mapsto e_i$$

e dunque che $\varphi_{\mathcal{B}}^{-1}(v_i) = e_i$

- Notiamo come, in generale, si ha che:

$$L_A(e_i) = A e_i = A \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,i} \\ \vdots \\ a_{m,i} \end{pmatrix} = A^i$$

dove i è la rispettiva posizione contenente 1 dei vari vettori e_i appartenenti alla base canonica

- Infine, notiamo che:

$$\varphi_{\mathcal{C}}(A^i) = a_{1,i} w_1 + \dots + a_{m,i} w_m = w_i$$

e che, per sua costruzione stessa, si ha $f(v_i) = w_i$

- Dunque, concludiamo che:

$$\varphi_C \circ L_A \circ \varphi_{\mathcal{B}^{-1}}(v_i) = \varphi_C \circ L_A(e_i) = \varphi_C(A^i) = w_i \implies$$

$$f = \varphi_C \circ L_A \circ \varphi_{\mathcal{B}^{-1}}$$

Esempi:

- Sia $V = \mathbb{R}[x]_{\leq 4}$, ossia lo spazio vettoriale inerente ai polinomi di grado minore o uguale a 4 con coefficienti in \mathbb{R} .
 - La base di V corrisponde a: $\mathcal{B} : 1, x, x^2, x^3, x^4$, dunque si ha che $\dim(V) = 5$
 - Sia inoltre $W = \mathbb{R}[x]_{\leq 3}$, la cui base è $\mathcal{C} : 1, x, x^2, x^3$, dunque $\dim(W) = 4$
 - Sia $f' : V \rightarrow W : p(x) \mapsto p'(x)$ la trasformazione lineare corrispondente alla derivata di un polinomio
 - La matrice di f' nelle basi \mathcal{B} e \mathcal{C} corrisponde a:

$$\begin{cases} f'(x^4) = 4x^3 \\ f'(x^3) = 3x^2 \\ f'(x^2) = 2x \\ f'(x) = 1 \\ f'(1) = 0 \end{cases} \implies \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

- Dati ancora $V = \mathbb{R}[x]_{\leq 4}$ e $W = \mathbb{R}[x]_{\leq 3}$, consideriamo invece la trasformazione lineare $\Delta : V \rightarrow W : p(x) \mapsto p(x+1) - p(x)$, corrispondente all'operatore differenza (anche detta "derivata discreta")
 - La matrice di Δ nelle basi \mathcal{B} e \mathcal{C} corrisponde a:

$$\begin{cases} \Delta(x^4) = (x+1)^4 - x^4 = 4x^3 + 6x^2 + 4x + 1 \\ \Delta(x^3) = (x+1)^3 - x^3 = 3x^2 + 3x + 1 \\ \Delta(x^2) = (x+1)^2 - x^2 = 2x + 1 \\ \Delta(x) = (x+1) - x^0 = 1 \\ \Delta(1) = (x+1)^0 - x^0 = 0 \end{cases} \implies \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 3 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

- Siano $V = W = \mathbb{R}^2$ e sia:

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + 3y \\ 2x + 4y \end{pmatrix}$$

- Siano

$$\mathcal{B} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad \mathcal{C} = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

rispettivamente la base di $V = \mathbb{R}^2$ e di $W = \mathbb{R}^2$

- Consideriamo quindi la matrice A di f nelle basi \mathcal{B} e \mathcal{C}

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

- Poiché

$$f \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 1 + 3 \cdot 1 \\ 2 \cdot 1 + 4 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \end{pmatrix}$$

e poiché la prima colonna di A è determinata dalle coordinate di $f \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ nella base \mathcal{C} , ne segue che sia necessario risolvere il seguente sistema affinché si possa ottenere il valore di a e c :

$$a \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \end{pmatrix} \implies \begin{cases} a - 2c = 4 \\ 3a + 4c = 6 \end{cases} \implies \left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & 4 \\ 3 & 4 & 6 \end{array} \right)$$

- Tramite la riduzione a scala, troviamo che:

$$\left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & 4 \\ 3 & 4 & 6 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2+ = -3R_1} \left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & 4 \\ 0 & 10 & -6 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2* = \frac{1}{10}} \left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & 4 \\ 0 & 1 & -\frac{3}{5} \end{array} \right)$$

$$\xrightarrow{R_1+ = -2R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 1 & 0 & \frac{14}{5} \\ 0 & 1 & -\frac{3}{5} \end{array} \right) \implies \begin{cases} a = \frac{14}{5} \\ c = -\frac{3}{5} \end{cases}$$

- Analogamente, otteniamo il valore di b e d risolvendo il seguente sistema:

$$b \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + d \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \implies b \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + d \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + 3(-1) \\ 2 + 4(-1) \end{pmatrix} \implies$$

$$\implies b \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + d \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \end{pmatrix} \implies \begin{cases} b - 2d = -2 \\ 3b + 4d = -2 \end{cases} \implies \left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & -2 \\ 3 & 4 & -2 \end{array} \right)$$

- Riducendo a scala, otteniamo che:

$$\left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & -2 \\ 3 & 4 & -2 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2+ = -3R_1} \left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & -2 \\ 0 & 10 & 4 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2* = \frac{1}{10}} \left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & -2 \\ 0 & 1 & \frac{2}{5} \end{array} \right)$$

$$\xrightarrow{R_1+ = -2R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 1 & 0 & -\frac{6}{5} \\ 0 & 1 & \frac{2}{5} \end{array} \right) \implies \begin{cases} b = -\frac{6}{5} \\ d = \frac{2}{5} \end{cases}$$

- Quindi, concludiamo la matrice di f nelle basi \mathcal{B} e \mathcal{C} sia:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{14}{5} & -\frac{6}{5} \\ -\frac{3}{5} & \frac{2}{5} \end{pmatrix}$$

9.5 Determinante di una matrice

Definition 81. Trasformazione multilineare

Una trasformazione lineare del tipo

$$f : V_1 \times \dots \times V_k \rightarrow W : (v_1, \dots, v_k) \rightarrow f(v_1, \dots, v_k)$$

viene detta **multilineare** se $\forall i \in [1, k]$ dati $\lambda, \mu \in K$ si verifica che:

$$f(v_1, \dots, \lambda v'_i + \mu v''_i, \dots, v_n) = \lambda f(v_1, \dots, v'_i, \dots, v_n) + \mu f(v_1, \dots, v''_i, \dots, v_n)$$

Corollary 23

Ricordando che

$$\underbrace{K^n \times \dots \times K^n}_{n \text{ volte}} = Mat_{n \times n}(K) = A^1, \dots, A^n = A_1, \dots, A_n$$

è facilmente intuibile una naturale correlazione tra una trasformazione multilineare ed una matrice

Definition 82. Determinante di una matrice

Definiamo come **determinante** di una matrice l'unica trasformazione lineare $det : Mat_{n \times n}(K) \rightarrow K$ che verifica le seguenti tre proprietà:

1. det è multilineare su righe e colonne della matrice
2. A_1, \dots, A_n e A^1, \dots, A^n sono una base di $A \in Mat_{n \times n}(K)$ se e solo se $det(A) \neq 0$
3. $det(I_n) = 1$, dove I_n è la matrice identità di ordine n

Observation 52

Per la proprietà 2), se una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$ contiene due righe (o colonne) uguali, allora A_1, \dots, A_n (o A^1, \dots, A^n) non sono linearmente indipendenti e di conseguenza neanche una base di A , implicando quindi che $det(A) = 0$

Proposition 69. Determinante alternante su righe e colonne

Data una matrice $A = (A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) \in Mat_{n \times n}(K)$, si verifica che:

$$det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) = -det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n)$$

dunque, scambiando due righe (o colonne) della matrice il determinante cambia segno

Dimostrazione:

- Supponiamo che $1 \neq -1$ nel campo K (escludendo quindi campi come Z_2)
- Data una matrice $A = (A_1, \dots, A_i + A_j, \dots, A_i + A_j, \dots, A_n)$, per la proprietà 2) del determinante si ha che:

$$\det(A_1, \dots, A_i + A_j, \dots, A_i + A_j, \dots, A_n) = 0$$

- Per multilinearità del determinante, si ha che:

$$\begin{aligned} 0 &= \det(A_1, \dots, A_i + A_j, \dots, A_i + A_j, \dots, A_n) \implies \\ \implies 0 &= \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_i + A_j, \dots, A_n) + \det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i + A_j, \dots, A_n) \implies \\ \implies 0 &= \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_i, \dots, A_n) + \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) + \\ &\quad + \det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n) + \det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_j, \dots, A_n) \implies \\ \implies 0 &= 0 + \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) + \det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n) + 0 \implies \\ \implies \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) &= -\det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n) \end{aligned}$$

Theorem 70. Formula di Binet

Date due matrici $A, B \in Mat_{n \times n}$, si ha che:

$$\det(AB) = \det(A) \cdot \det(B)$$

(*dimostrazione omessa*)

9.5.1 Formula di Leibniz e Regola di Sarrus

Definition 83. Formula di Leibniz

Tramite le sue proprietà 1), 3) e la sua alternanza su righe e colonne, il determinante di una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$ può essere definito come:

$$\det(A) := \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) \cdot a_{1,\sigma(1)} \cdot \dots \cdot a_{n,\sigma(n)}$$

Corollary 24

Se $A \in Mat_{2 \times 2}(K)$, allora

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \implies \det(A) = ad - bc$$

Dimostrazione:

- Sia

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{pmatrix}$$

- Dato $S_2 = \{(1)(2), (12)\}$, si verifica che:

$$\det(A) = \sum_{\sigma \in S_2} \operatorname{sgn}(\sigma) \cdot a_{1,\sigma(1)} \cdot a_{2,\sigma(2)} = a_{1,1}a_{2,2} - a_{1,2}a_{2,1} = ad - bc$$

Corollary 25

Se $A \in \operatorname{Mat}_{3 \times 3}(K)$, allora

$$A = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \implies \det(A) = aei + bfg + cdh - afh - bdi - ceg$$

Dimostrazione:

- Sia

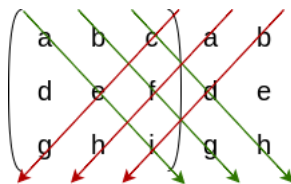
$$A = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{pmatrix}$$

- Dato $S_3 = \{(1)(2)(3), (12)(3), (13)(2), (23)(1), (123), (321)\}$, si verifica che:

$$\begin{aligned} \det(A) &= \sum_{\sigma \in S_3} \operatorname{sgn}(\sigma) \cdot a_{1,\sigma(1)} \cdot a_{2,\sigma(2)} \cdot a_{3,\sigma(3)} = \\ &= a_{1,1}a_{2,2}a_{3,3} - a_{1,2}a_{2,1}a_{3,3} - a_{1,1}a_{2,3}a_{3,2} - a_{1,3}a_{2,2}a_{3,1} + a_{1,2}a_{2,3}a_{3,1} + a_{1,3}a_{2,1}a_{3,2} = \\ &= aei - bdi - ceg - afh + bfg + cdh \end{aligned}$$

Method 6. Regola di Sarrus

La **Regola di Sarrus** permette ricordare facilmente il calcolo del determinante di una matrice quadrata di ordine 3, ricopiando a destra della matrice le sue prime due colonne, per poi **sommare le tre diagonal** e **sottrarre le tre anti-diagonal**:



$$A \in \operatorname{Mat}_{3 \times 3}(K) \implies \det(A) = aei + bfg + cdh - afh - bdi - ceg$$

Esempio:

- Data la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$$

si ha che:

$$\det(A) = 1 \cdot 4 - 2 \cdot 3 = -2$$

- Data la matrice

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 0 \end{pmatrix}$$

si ha che:

$$\det(B) = 1 \cdot 5 \cdot 0 + 2 \cdot 6 \cdot 7 + 3 \cdot 4 \cdot 8 - 2 \cdot 4 \cdot 0 - 3 \cdot 5 \cdot 7 - 1 \cdot 6 \cdot 8 = 27$$

Observation 53

Data una matrice $A \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$, se esiste almeno una riga A_i o colonna A^j contenente tutti zeri, allora $\det(A) = 0$

9.5.2 Determinante tramite riduzione a scala**Definition 84. Matrice triangolare**

Sia $A \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$. Tale matrice viene detta **triangolare superiore** se $\forall i > j$ si ha che $a_{i,j} = 0$, ossia se sotto la diagonale principale vi sono tutti zeri

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & \cdots & a_{1,n} \\ 0 & a_{2,2} & a_{2,3} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 0 & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & a_{n,n} \end{pmatrix}$$

o **triangolare inferiore** se $\forall i < j$ si ha che $a_{i,j} = 0$, ossia se sopra la diagonale principale vi sono tutti zeri

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ a_{1,2} & a_{2,2} & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & a_{n-1,n-2} & a_{n-1,n-1} & 0 \\ a_{n,1} & \cdots & \cdots & a_{n,n-1} & a_{n,n} \end{pmatrix}$$

Observation 54

Se $T \in Mat_{n \times n}(K)$ è una matrice triangolare, allora il suo determinante corrisponde al **prodotto della sua diagonale**

$$\det(T) = a_{1,1} \cdot a_{2,2} \cdot \dots \cdot a_{n,n}$$

Nel caso in cui vi sia uno zero sulla diagonale di T , ne segue naturalmente che $\det(T) = 0$

Observation 55

Una matrice ridotta a scala è sempre triangolare.

Method 7. Calcolo del determinante tramite riduzione a scala

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$, è possibile ricavare il suo determinante tramite la sua riduzione a scala, poiché:

1. Scambiare due righe (o colonne) **inverte il segno del determinante**
2. Moltiplicare una riga (o colonna) per uno scalare $\lambda \in K^*$ **moltiplica anche il determinante** per tale scalare
3. Sommare ad una riga (o colonna) un multiplo di un'altra riga (o colonna) **non altera il determinante**

Dunque, data la riduzione a scala S di A , è possibile calcolare $\det(A)$ tramite il calcolo di $\det(S)$, per poi invertire gli effetti subiti dal determinante in base alle operazioni svolte durante la riduzione.

Dimostrazione degli effetti della riduzione:

- Sia $A = (A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) \in Mat_{n \times n}(K)$
- Abbiamo già dimostrato come scambiare due righe o colonne implichi che il determinante cambi segno, dunque

$$\det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) = -\det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n)$$

- Data $A' = (A_1, \dots, \lambda A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) \in Mat_{n \times n}(K)$, per multilinearità del determinante si ha che:

$$\det(A') \det(A_1, \dots, \lambda A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) = \lambda \cdot \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) = \lambda \cdot \det(A)$$

- Data $A'' = (A_1, \dots, A_i + \mu A_j, \dots, A_j, \dots, A_n) \in Mat_{n \times n}(K)$, per multilinearità del determinante si ha che:

$$\begin{aligned} \det(A'') &= \det(A_1, \dots, A_i + \mu A_j, \dots, A_j, \dots, A_n) = \\ &= \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) + \mu \cdot \det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_j, \dots, A_n) = \\ &= \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) + \mu \cdot 0 = \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) = \det(A) \end{aligned}$$

Esempio:

- Riprendiamo la matrice dell'esempio precedente, il cui determinante sappiamo già essere 27:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 0 \end{pmatrix}$$

- Effettuiamo la riduzione a scala di tale matrice:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{R_2+ = -4R_1} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -3 & -6 \\ 7 & 8 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{R_3+ = -7R_1} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -3 & -6 \\ 0 & -6 & -21 \end{pmatrix}$$

$$\xrightarrow{R_2* = \frac{1}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & -6 & -21 \end{pmatrix} \xrightarrow{R_3+ = 6R_2} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & -9 \end{pmatrix} \implies \det(S) = -9$$

- Tra i vari passaggi effettuati durante la riduzione a scala, l'unico ad influenzare il determinante è la terza. Dunque, si ha che:

$$\det(S) = -\frac{1}{3} \cdot \det(A) \implies -9 = -\frac{1}{3} \cdot \det(A) \implies \det(A) = 27$$

9.5.3 Sviluppo di Laplace**Definition 85. Sottomatrice**

Data una matrice $A \in \text{Mat}_{m \times n}(K)$, definiamo come **sottomatrice di A** una matrice ottenuta cancellando un determinato numero di righe e/o colonne dalla matrice originale

Definition 86. Minore di una matrice

Data una matrice $A \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$, definiamo come **minori di A** tutte le sottomatrici quadrate ottenute da A .

Denotiamo come $M_{i,j}$ il minore ottenuto cancellando la riga i e la colonna j dalla matrice A .

Theorem 71. Sviluppo di Laplace

Data una matrice $A \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$, lo **sviluppo di Laplace sulla i -esima riga di A** è definito come:

$$\det(A) = \sum_{k=1}^n (-1)^{i+k} \cdot a_{i,k} \cdot \det(M_{i,k}) = \sum_{k=1}^n a_{i,k} \cdot \text{cof}_{i,k}(A)$$

dove $\text{cof}_{i,k}(A) = (-1)^{i+k} \cdot \det(M_{i,k})$ viene detto il **cofattore (o complemento algebrico)** dell'entrata $a_{i,k}$.

Analogamente, lo sviluppo di Laplace sulla j -esima colonna di A è definito come:

$$\det(A) = \sum_{h=1}^n (-1)^{h+j} \cdot a_{h,j} \cdot \det(M_{h,j}) = \sum_{h=1}^n a_{h,j} \cdot \text{cof}_{h,j}(A)$$

Lo sviluppo di Laplace è conveniente nel caso in cui si debba calcolare il determinante di una matrice di ordine 4+ o avente una riga o colonna contenente molti zeri.

(*dimostrazione omessa*)

Esempi:

1. • Riprendiamo la matrice già vista in vari esempi precedenti, il cui determinante sappiamo già essere 27:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 0 \end{pmatrix}$$

- Effettuiamo lo sviluppo di Laplace su A_3 :

$$\begin{aligned} \det(B) &= (-1)^{3+1} \cdot 7 \cdot \det \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 6 \end{pmatrix} + (-1)^{3+2} \cdot 8 \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 4 & 6 \end{pmatrix} + (-1)^{3+3} \cdot 0 \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 5 \end{pmatrix} = \\ &= 7(2 \cdot 6 - 3 \cdot 5) - 8(1 \cdot 6 - 3 \cdot 4) + 0 = -21 + 48 = 27 \end{aligned}$$

2. • Calcoliamo il determinante della seguente matrice quadrata di ordine 4:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 0 & -1 \\ 2 & 3 & 5 & 4 \\ 7 & 8 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & 0 & 6 \end{pmatrix}$$

- Effettuiamo lo sviluppo di Laplace su A^3 :

$$\det(A) = 0 + (-1)^{2+3} \cdot 5 \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 4 & -1 \\ 7 & 8 & -2 \\ 0 & 1 & 6 \end{pmatrix} + 0 - 0 = -5 \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 4 & -1 \\ 7 & 8 & -2 \\ 0 & 1 & 6 \end{pmatrix}$$

- Il calcolo di $\det(A)$ viene quindi ridotto al calcolo di $\det(M_{2,3})$, il quale può essere facilmente calcolato tramite la regola di Sarrus o tramite un nuovo sviluppo di Laplace
- Utilizzando la regola di Sarrus, abbiamo che:

$$\det(A) = -5 \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 4 & -1 \\ 7 & 8 & -2 \\ 0 & 1 & 6 \end{pmatrix} = -5(48 + 0 + (-7) - 168 - 0 - (-2)) = 625$$

- Utilizzando lo sviluppo di Laplace su $(M_{2,3})^1$, invece, abbiamo che:

$$\begin{aligned} \det(A) = -5 \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 4 & -1 \\ 7 & 8 & -2 \\ 0 & 1 & 6 \end{pmatrix} &= -5 \left[(-1)^{1+1} \cdot 1 \cdot \det \begin{pmatrix} 8 & -2 \\ 1 & 6 \end{pmatrix} + \right. \\ &\quad \left. + (-1)^{2+1} \cdot 7 \cdot \det \begin{pmatrix} 4 & -1 \\ 1 & 6 \end{pmatrix} \right] = -5[50 - 175] = 625 \end{aligned}$$

9.5.4 Regola di Cramer

Theorem 72. Regola di Cramer

Dato un sistema lineare $Ax = b$:

$$\begin{cases} a_{1,1}x_1 + \dots + a_{1,n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{m,1}x_1 + \dots + a_{m,n}x_n = b_m \end{cases}$$

dove A è una matrice di coefficienti tale che $\det(A) \neq 0$, allora il sistema ammette la seguente unica soluzione:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{\det(b, A^2, \dots, A^{n-1}, A^n)}{\det(A)} \\ x_2 = \frac{\det(A^1, b, \dots, A^{n-1}, A^n)}{\det(A)} \\ \vdots \\ x_n = \frac{\det(A^1, A^2, \dots, b, A^n)}{\det(A)} \\ x_n = \frac{\det(A^1, A^2, \dots, A^{n-1}, b)}{\det(A)} \end{cases}$$

Esempio:

- Consideriamo il sistema

$$\begin{cases} x + 2y + 3z = 1 \\ 4x + 5y + 6z = 0 \\ 7x + 8y = 0 \end{cases}$$

la cui matrice dei coefficienti corrisponde è

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 0 \end{pmatrix}$$

dove $\det(A) = 27$

- Per la regola di Cramer, si ha che:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{27} \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 5 & 6 \\ 0 & 8 & 0 \end{pmatrix} \\ y = \frac{1}{27} \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 4 & 0 & 6 \\ 7 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ z = \frac{1}{27} \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 4 & 5 & 0 \\ 7 & 8 & 0 \end{pmatrix} \end{cases} \implies \begin{cases} x = \frac{1}{27} \cdot (-48) = -\frac{16}{9} \\ y = \frac{1}{27} \cdot (42) = \frac{14}{9} \\ z = \frac{1}{27} \cdot (-3) = -\frac{1}{9} \end{cases}$$

9.6 Inversa di una matrice

Theorem 73. Inversione di una matrice

Una matrice $A \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$ è invertibile solo se $\exists! A^{-1} \in \text{Mat}_{n \times n}(K) \mid A \cdot A^{-1} = A^{-1} \cdot A = I_n$.

Le seguenti condizioni sono equivalenti tra loro:

1. A è invertibile
2. $\text{rk}(A) = n$
3. A_1, \dots, A_n sono una base di K^n
4. A^1, \dots, A^n sono una base di K^n
5. $\det(A) \neq 0$

Dimostrazione:

- 1) \iff 2)
 - Supponiamo che $\exists! B \in \text{Mat}_{n \times n}(K) \mid A \cdot B = B \cdot A = I_n$
 - Sia $B = (B^1, \dots, B^n)$. Allora, ne segue che $AB = (A \cdot B^1, \dots, A \cdot B^n)$

– Dunque, si ha che:

$$\begin{aligned} AB = I_n &\iff AB^1 = e_1, AB^2 = e_2, \dots, AB^n = e_n \iff \\ &\iff L_A(B^1) = e_1, L_A(B^2) = e_2, \dots, L_A(B^n) = e_n \iff e_1, e_2, \dots, e_n \in \text{Im}(L_A) \iff \\ &\iff \text{Im}(L_A) = \text{Span}(e_1, \dots, e_n) = K^n \iff \text{rk}(A) = n \end{aligned}$$

• 2) \iff 3), 4)

– Supponendo che $\text{rk}(A) = n$, allora

$$\begin{aligned} \text{rk}(A) = n &\iff \dim(\text{Span}(A^1, \dots, A^n)) = \dim(\text{Span}(A_1, \dots, A_n)) \iff \\ &\iff \text{Span}(A^1, \dots, A^n) = K^n \iff \begin{cases} A^1, \dots, A^n \text{ sono base di } K^n \\ A_1, \dots, A_n \text{ sono base di } K^n \end{cases} \end{aligned}$$

• 3), 4) \iff 5)

– Per definizione stessa di determinante, si ha che A^1, \dots, A^n e A_1, \dots, A_n sono base di K^n se e solo se $\det(A) \neq 0$

Method 8. Inversione tramite algoritmo di Gauss-Jordan

Se $A \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$ è invertibile e $(A \mid I_n)$ e $(I_n \mid B)$ sono equivalenti per righe, allora $B = A^{-1}$

Esempi:

1. • Sia

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$$

dove $\det(A) = -2$, dunque A è invertibile

• Procedendo con l'algoritmo di Gauss-Jordan, si ha che:

$$\begin{aligned} (A \mid I_n) &= \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 4 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2+ = -3R_1} \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & -3 & 1 \end{array} \right) \\ &\xrightarrow{R_1+ = R_2} \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & -2 & 1 \\ 0 & -2 & -3 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2* = -\frac{1}{2}} \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & \frac{3}{2} & -\frac{1}{2} \end{array} \right) = (I_n \mid B) \\ &\implies A^{-1} = \begin{pmatrix} -2 & 1 \\ \frac{3}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

dove $\det(A^{-1}) = -\frac{1}{2}$

2. • Sia

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 0 \end{pmatrix}$$

dove $\det(A) = 27$, dunque A è invertibile

- Procedendo con l'algoritmo di Gauss-Jordan, si ha che:

$$\begin{aligned}
(A \mid I_N) &= \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 2 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 5 & 6 & 0 & 1 & 0 \\ 7 & 8 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2+ = -4R_1} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 2 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & -6 & -4 & 1 & 0 \\ 7 & 8 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \\
&\xrightarrow{R_3+ = -7R_1} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 2 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & -6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & -6 & -21 & -7 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{R_3+ = -2R_2} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 2 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & -6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -9 & 1 & -2 & 1 \end{array} \right) \\
&\xrightarrow{R_2* = -\frac{1}{3}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 2 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & \frac{4}{3} & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -9 & 1 & -2 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{R_3* = -\frac{1}{9}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 2 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & \frac{4}{3} & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{9} & \frac{2}{9} & -\frac{1}{9} \end{array} \right) \\
&\xrightarrow{R_1+ = -2R_2} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & -\frac{5}{3} & \frac{2}{3} & 0 \\ 0 & 1 & 2 & \frac{4}{3} & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{9} & \frac{2}{9} & -\frac{1}{9} \end{array} \right) \xrightarrow{R_1+ = R_3} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -\frac{16}{9} & \frac{8}{9} & -\frac{1}{9} \\ 0 & 1 & 2 & \frac{4}{3} & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{9} & \frac{2}{9} & -\frac{1}{9} \end{array} \right) \\
&\xrightarrow{R_2+ = -2R_3} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -\frac{16}{9} & \frac{8}{9} & -\frac{1}{9} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{14}{9} & -\frac{7}{9} & \frac{2}{9} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{9} & \frac{2}{9} & -\frac{1}{9} \end{array} \right) \Rightarrow A^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{16}{9} & \frac{8}{9} & -\frac{1}{9} \\ \frac{14}{9} & -\frac{7}{9} & \frac{2}{9} \\ -\frac{1}{9} & \frac{2}{9} & -\frac{1}{9} \end{pmatrix} \Rightarrow \\
&\Rightarrow A^{-1} = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} -16 & 8 & -1 \\ 14 & -7 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

dove $\det(A^{-1}) = \frac{1}{27}$

Corollary 26

Data una matrice $A \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$, si ha che:

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

Dimostrazione:

- Per la formula di Binet, si ha che:

$$1 = \det(I_n) = \det(A \cdot A^{-1}) = \det(A)\det(A^{-1}) \Rightarrow \det(A)^{-1} = \det(A^{-1})$$

Definition 87. Matrice trasposta

Data una matrice $A \in Mat_{m \times n}(K)$, definiamo come **matrice trasposta** la matrice $A^T \in Mat_{n \times m}(K)$ avente come i -esima riga la i -esima colonna della matrice A e come j -esima colonna la j -esima colonna di A

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix} \Rightarrow A^T = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \cdots & a_{m,1} \\ a_{1,2} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{1,n} & \cdots & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}$$

Esempio:

- Data la seguente matrice A , la sua trasposta corrisponde a:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ 9 & 10 & 11 & 12 \end{pmatrix} \Rightarrow A^T = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 \\ 2 & 6 & 10 \\ 3 & 7 & 11 \\ 4 & 8 & 12 \end{pmatrix}$$

Observation 56

Date due matrici $A, B \in Mat_{n \times n}(K)$, si verifica che:

- $\det(A) = \det(A^T)$
- $(AB)^T = B^T A^T$

(dimostrazione omessa)

Definition 88. Matrice dei cofattori

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$, definiamo come **matrice dei cofattori** la matrice $A^* \in Mat_{n \times n}(K)$ avente come entrate i cofattori di ogni entrata della matrice A

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} \Rightarrow A^* = \begin{pmatrix} \text{cof}(A)_{1,1} & \cdots & \text{cof}(A)_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cof}(A)_{n,1} & \cdots & \text{cof}(A)_{n,n} \end{pmatrix}$$

dove ricordiamo che

$$\text{cof}(A)_{i,j} = (-1)^{i+j} \cdot \det(M_{i,j})$$

Definition 89. Matrice aggiunta

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$, definiamo come **matrice aggiunta** la trasposta della matrice dei cofattori di A :

$$adj(A) = (A^*)^T$$

Theorem 74. Inversa di una matrice tramite aggiunta

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$ dove $\det(A) \neq 0$, si verifica che:

$$A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} \cdot adj(A)$$

Dimostrazione:

- Come conseguenza dello sviluppo di Laplace, si verifica che:

$$A \cdot adj(A) = adj(A) \cdot A = \det(A) \cdot I_n$$

- Dunque, concludiamo facilmente che:

$$\det(A)^{-1} \cdot A \cdot adj(A) = I_n \implies \det(A)^{-1} \cdot adj(A) = A^{-1}$$

Esempio:

- Prendiamo ancora una volta la nostra solita matrice esempio, il cui determinante sappiamo essere $\det(A) = 27$:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 0 \end{pmatrix}$$

- La sua matrice dei cofattori corrisponde a:

$$A^* = \begin{pmatrix} cof_{1,1}(A) & cof_{1,2}(A) & cof_{1,3}(A) \\ cof_{2,1}(A) & cof_{2,2}(A) & cof_{2,3}(A) \\ cof_{3,1}(A) & cof_{3,2}(A) & cof_{3,3}(A) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -48 & 42 & -3 \\ 24 & -21 & 6 \\ -3 & 6 & -3 \end{pmatrix}$$

mentre la conseguente matrice aggiunta corrisponde a:

$$adj(A) = \begin{pmatrix} -48 & 24 & -3 \\ 42 & -21 & 6 \\ -3 & 6 & -3 \end{pmatrix}$$

- Dunque, la matrice inversa di A corrisponde a:

$$A^{-1} = \frac{1}{27} \begin{pmatrix} -48 & 24 & -3 \\ 42 & -21 & 6 \\ -3 & 6 & -3 \end{pmatrix} = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} -16 & 8 & -1 \\ 14 & -7 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \end{pmatrix}$$

Observation 57

Data una matrice $A \in Mat_{2 \times 2}(K)$, si verifica che:

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \implies A^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$$

Dimostrazione:

- Sia

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

- La sua matrice aggiunta corrisponde a:

$$A^* = \begin{pmatrix} d & -c \\ -b & a \end{pmatrix} \implies adj(A) = (A^*)^T = A = \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & d \end{pmatrix}$$

- Di conseguenza, la sua inversa sarà:

$$A^{-1} = \frac{1}{det(A)} \cdot adj(A) = \frac{1}{ad - bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & d \end{pmatrix}$$

9.7 Teorema degli orlati

Definition 90. Orlato di un minore

Data una matrice $A \in Mat_{m \times n}(K)$ e dati un suo minore M di ordine r e un minore M' di ordine $r + 1$, diciamo che M' è un **orlato** di M se quest'ultimo è anche un minore di M'

Esempio:

- Consideriamo la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ 9 & 10 & 11 & 12 \end{pmatrix}$$

e il suo minore M di ordine 2 ottenuto eliminando le colonne 2 e 4 e la riga 3

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 5 & 7 \end{pmatrix}$$

- Gli orlati di M corrispondono a:

$$M'_1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 5 & 7 & 8 \\ 9 & 11 & 12 \end{pmatrix} \quad M'_2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 5 & 6 & 7 \\ 9 & 10 & 11 \end{pmatrix}$$

Observation 58

Data $A \in \text{Mat}_{m \times r}(K)$ e un suo minore M di ordine r , allora M ha $(m-r)(n-r)$ orlati in A

Theorem 75. Teorema degli orlati (o di Kronecker)

Data $A \in \text{Mat}_{m \times r}(K)$, le seguenti condizioni sono equivalenti:

1. $rk(A) = r$
2. Esiste un minore M di ordine r con $\det(M) \neq 0$, dove per ogni minore B di ordine maggiore di r si ha che $\det(B) = 0$
3. Esiste un minore M di ordine r con $\det(M) \neq 0$, dove per ogni orlato M' di M si ha $\det(M') = 0$

Esempi:

1. • Vogliamo discutere il comportamento di tale sistema al variare dei parametri $a, b \in \mathbb{R}$:

$$\begin{cases} ax + y + z = 1 \\ x + ay + z = 0 \\ x + y + az = b \end{cases} \implies A_b = \left(\begin{array}{ccc|c} a & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & 1 & 0 \\ 1 & 1 & a & b \end{array} \right) \implies$$

$$\implies \begin{cases} rk(A_b) = rk(A) & \text{se } \dim(A^1, \dots, A^n, b) = \dim(A^1, \dots, A^n) \\ rk(A_b) = rk(A) + 1 & \text{se } \dim(A^1, \dots, A^n, b) \neq \dim(A^1, \dots, A^n) \end{cases}$$

- Tramite la regola di Sarrus, otteniamo che il determinante corrisponde a:

$$\det(A) = a^3 + 1 + 1 - a - a - a = a^3 - 3a + 2 = (a+2)(a-1)^2$$

- Se $a \neq 1$ o $a \neq -2$ allora $\det(A) \neq 0$, implicando che $rk(A) = 3$.

Inoltre, siccome $rk(A_b) \leq \min(3, 4) = 3$ e siccome $rk(A_b) = rk(A)$ oppure $rk(A_b) = rk(A) + 1$, allora ne segue necessariamente che $rk(A) = rk(A_b) = 3$.

Per il teorema di Rouché-Capelli, lo spazio affine generato dalle soluzioni ha dimensione pari a 0, dunque il sistema è **determinato** ed esiste un'unica soluzione dipendente dai parametri assunti da a e b .

- Se $a = 1$, allora $\det(A) = 0$, poiché radice del polinomio precedentemente trovato.

Tuttavia, dalla riduzione a scala otteniamo che::

$$A_b = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & b \end{array} \right) \xrightarrow{R_2+ = -R_1} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & b \end{array} \right)$$

$$\begin{aligned} \xrightarrow{R_3+ = -R_1} & \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & b-1 \end{array} \right) \xrightarrow{R_3+ = -R_2} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & b \end{array} \right) \\ & \xrightarrow{R_3+ = b \cdot R_2} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \end{aligned}$$

implicando che $rk(A) = 1$ e $rk(A_b) = 2$, dunque il sistema **non ammette soluzioni**.

- Se $a = -2$, allora $\det(A) = 0$, poiché radice del polinomio precedentemente trovato.

Per il teorema degli orlati, si ha che l'unico orlato del minore $M_{3,3}$, dove $\det(M_{3,3}) = 3$ è la matrice A stessa, che sappiamo avere determinante nullo, dunque $rk(A) = 2$

$$A = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{pmatrix} \implies rk(A) = 2$$

Nel caso della matrice A_b , invece, consideriamo il seguente minore:

$$A_b = \left(\begin{array}{ccc|c} -2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & b \end{array} \right)$$

Gli unici due orlati di tale minore sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} M'_1 = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{pmatrix} = A \implies \det(M'_1) = \det(A) = 0 \\ M'_2 = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 0 \\ 1 & 1 & b \end{pmatrix} \implies \det(M'_2) = 4b + 0 + 1 + 2 - b = 3b + 3 \end{array} \right.$$

Dunque, si ha che:

$$rk(A) = \begin{cases} 2 & \text{se } a = -2, b = -1 \implies rk(A) = rk(A_b) \implies \exists \text{ inf. soluzioni} \\ 3 & \text{se } a = -2, b \neq -1 \implies rk(A) \neq rk(A_b) \implies \nexists \text{ soluzioni} \end{cases}$$

- In particolare, se $a = -2$ e $b = -1$, possiamo trovare le infinite soluzioni del sistema in funzione di x :

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

applichiamo la regola di Cramer per trovare il valore di y in funzione di x , per poi sostituire il valore ottenuto nella seconda equazione, trovando il valore di z in funzione di x :

$$\begin{cases} y = \frac{1}{3} \cdot \det \begin{pmatrix} -x & 1 \\ -1-x & -2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3}(3x+1) = x + \frac{1}{3} \\ y - 2z = 1 - x \end{cases} \implies \begin{cases} y = x + \frac{1}{3} \\ z = \frac{2}{3} + x \end{cases}$$

Le soluzioni del sistema indeterminato, quindi, appaiono nella forma:

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \end{pmatrix} + x \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

dunque generanti una retta (difatti, la dimensione dello spazio affine generato è $n - rk(A) = 3 - 2 = 1$)

2. • Consideriamo il seguente insieme di equazioni parametriche corrispondenti ad un sottospazio affine in \mathbb{R}^3 , già analizzato precedentemente:

$$V = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \mid t_1, t_2 \in \mathbb{R} \right\}$$

- Siccome $\dim(V) = 2$, si verifica che

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in V \iff rk(A) = rk \begin{pmatrix} 1 & 4 & x-1 \\ 2 & 5 & y \\ 3 & 6 & z+1 \end{pmatrix} = 2$$

- Considerando il minore $M_{3,3}$, si ha che:

$$M_{3,3} = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 5 \end{pmatrix} \implies \det(M_{3,3}) = 5 - 8 = -3 \neq 0$$

- Siccome la matrice iniziale stessa è l'unico orlato di $M_{3,3}$, per il teorema degli orlati si verifica che:

$$rk(A) = \begin{cases} 2 & \text{se } \det(A) = 0 \\ 3 & \text{se } \det(A) \neq 0 \end{cases}$$

- Dunque, si ha che:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in V \iff rk(A) = 2 \iff \det(A) = 0$$

- Utilizzando lo sviluppo di Laplace sulla terza colonna, si ha che:

$$\begin{aligned} \det(A) = 0 &\iff (x-1) \cdot \det \begin{pmatrix} 2 & 5 \\ 3 & 6 \end{pmatrix} - y \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 3 & 6 \end{pmatrix} + (z-1) \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 5 \end{pmatrix} = 0 \iff \\ &\iff -3(x-1) + 6y - 3(z+1) \iff -3x + 6y - 3z = 0 \iff x - 2y + z = 0 \end{aligned}$$

- L'insieme di equazioni parametriche dato, quindi, equivale al seguente sistema di equazioni cartesiane:

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

corrispondente ad una retta in \mathbb{R}^3

3. • Dati la seguente retta r e il seguente piano π

$$r = \begin{cases} x = -2 + 3a \\ y = 1 - 2a \\ z = 5a \end{cases} \quad \pi = \begin{cases} x = 4 - 2b + 5c \\ y = 3b - c \\ z = 1 + b - 2c \end{cases}$$

possiamo trovare l'intersezione $r \cap \pi$ in \mathbb{R}^3 nei seguenti tre modi:

- (a) Troviamo i valori di a, b e c unendo i due sistemi:

$$\begin{cases} -2 + 3a = 4 - 2b + 5c \\ 1 - 2a = 3b - c \\ 5a = 1 + b - 2c \end{cases} = \begin{cases} 3a + 2b - 5c = 6 \\ 2a + 3b - c = 1 \\ 5a - b + 2c = 1 \end{cases} \implies A = \left(\begin{array}{ccc|c} 3 & 2 & -5 & 6 \\ 2 & 3 & -1 & 1 \\ 5 & -1 & 2 & 1 \end{array} \right)$$

Siccome $\det(A) = 82$ (*calcolo omissso*), possiamo applicare la regola di Cramer per trovare il valore di a , per poi sostituirlo nel sistema e trovare il valore di b e c :

$$\begin{aligned} &\begin{cases} a = \frac{1}{82} \cdot \det \begin{pmatrix} 6 & 2 & -5 \\ 1 & 3 & -1 \\ 1 & -1 & 2 \end{pmatrix} = \frac{1}{82} \cdot 44 = \frac{22}{41} \\ c = 2a + 3b - 1 \\ b = 5a + 2c - 1 \end{cases} \implies \\ &\begin{cases} a = \frac{22}{41} \\ c = \frac{44}{41} + 3b - 1 = 3b + \frac{3}{41} \\ b = \frac{110}{41} + 2c - 1 = 2c + \frac{69}{41} \end{cases} \implies \begin{cases} a = \frac{22}{41} \\ c = 3 \left(2c + \frac{69}{41} \right) + \frac{3}{41} = 6c + \frac{210}{41} \\ b = 2c + \frac{69}{41} \end{cases} \implies \\ &\implies \begin{cases} a = \frac{22}{41} \\ c = -\frac{42}{41} \\ b = 2 \left(-\frac{42}{41} \right) + \frac{69}{41} = -\frac{15}{41} \end{cases} \implies \begin{cases} x = -2 + 3a \\ y = 1 - 2a \\ z = 5a \end{cases} = \begin{cases} x = -\frac{16}{41} \\ y = -\frac{3}{41} \\ z = \frac{110}{41} \end{cases} \end{aligned}$$

(b) Troviamo il sistema di equazioni cartesiane descrittive π :

$$\begin{aligned}\pi = \begin{cases} x = 4 - 2b + 5c \\ y = 3b - c \\ z = 1 + b - 2c \end{cases} &\iff \begin{pmatrix} x-4 \\ y \\ z-1 \end{pmatrix} = b \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \\ -2 \end{pmatrix} \iff \\ &\iff rk \begin{pmatrix} -2 & 5 & x-4 \\ 3 & -1 & y \\ 1 & -2 & z-1 \end{pmatrix} = 2\end{aligned}$$

Siccome $\det(M_{3,3}) = -13 \neq 0$, per il teorema degli orlati, si ha che:

$$\begin{aligned}\iff rk \begin{pmatrix} -2 & 5 & x-4 \\ 3 & -1 & y \\ 1 & -2 & z-1 \end{pmatrix} = 2 &\iff \det \begin{pmatrix} -2 & 5 & x-4 \\ 3 & -1 & y \\ 1 & -2 & z-1 \end{pmatrix} = 0 \iff \\ (x-4)(-5) - y(-1) + (z-1)(-13) = 0 &\iff 5x - y + 13z = 33\end{aligned}$$

Siccome $x \in r \cap \pi \iff x \in r \wedge x \in \pi$, sostituendo i valori assunti da x, y e z nell'equazione cartesiana di π otteniamo che:

$$-5x + y - 13z = 33 \iff 5(-2 + 3a) - (1 - 2a) + 13(5a) = 33 \iff a = \frac{22}{41}$$

Una volta trovato il valore di a , procediamo analogamente al metodo precedente, sostituendo a nell'equazione parametrica di π e ricavando b e c per sostituzione.

(c) Troviamo il sistema di equazioni cartesiane descrittive π e il sistema di equazioni cartesiane descrittive r .

Sappiamo già che:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \pi \iff 5x - y + 13z = 33$$

dunque ricaviamo le equazioni cartesiane di r :

$$\begin{aligned}r = \begin{cases} x = -2 + 3a \\ y = 1 - 2a \\ z = 5a \end{cases} &\iff \begin{pmatrix} x+2 \\ y-1 \\ z \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 5 \end{pmatrix} \iff \\ &\iff rk \begin{pmatrix} 3 & x+2 \\ -2 & y-1 \\ 5 & z \end{pmatrix} = 1\end{aligned}$$

Considerando il minore di ordine 1 corrispondente all'entrata $a_{1,1} = 3$, dove quindi $\det(a_{1,1}) = 3$, per il teorema degli orlati si ha che:

$$rk \begin{pmatrix} 3 & x+2 \\ -2 & y-1 \\ 5 & z \end{pmatrix} = 1 \iff \begin{cases} \det \begin{pmatrix} 3 & x+2 \\ -2 & y-1 \end{pmatrix} = 0 \\ \det \begin{pmatrix} 3 & x+2 \\ 5 & z \end{pmatrix} = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} 2x + 3y + 1 = 0 \\ -5x + 3z - 10 = 0 \end{cases}$$

Possiamo quindi costruire un nuovo sistema di equazioni cartesiane corrispondente a $r \cap \pi$ utilizzando le due equazioni cartesiane descrittive r e l'equazione cartesiana descrivente π :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in r \cap \pi \iff \begin{cases} 5x - y + 13z = 33 \\ 2x + 3y + 1 = 0 \\ -5x + 3z - 10 = 0 \end{cases}$$

Poiché il determinante della matrice dei coefficienti associata a tale sistema è diverso da 0, è possibile ricavare i valori di x, y e z tramite la regola di Cramer, ottenendo una soluzione analoga agli altri due metodi

9.8 Matrici simili

Definition 91. Gruppo generale e speciale lineare

Definiamo come **gruppo generale lineare** il gruppo (GL, \cdot) , dove

$$GL(n, K) = \{A \in Mat_{n \times n}(K) \mid \det(A) \neq 0\}$$

Definiamo come **gruppo speciale lineare** il sottogruppo $(SL, \cdot) \subset (GL, \cdot)$, dove

$$SL(n, K) = \{A \in Mat_{n \times n}(K) \mid \det(A) = 1\}$$

Definition 92. Matrici simili

Date due matrici $A, B \in Mat_{n \times n}(K)$, tali matrici vengono dette **simili** se si verifica che:

$$\exists C \in GL(n, K) \mid A = C^{-1}BC$$

Definition 93. Matrice di transizione (o di cambiamento di base)

Sia $f : V \rightarrow V$ un endomorfismo e siano $\mathcal{B} = v_1, \dots, v_n$ e $\mathcal{C} = w_1, \dots, w_n$ due basi di V .

Data B la matrice di f in base \mathcal{B} e C la matrice di f in base \mathcal{C} , definiamo come **matrice di transizione (o di cambiamento di base)** la matrice $A = (A^1, \dots, A^n)$ tale che:

$$\forall j \in [1, n], A^j = \begin{pmatrix} a_{1,j} \\ \vdots \\ a_{n,j} \end{pmatrix} \mid w_j = a_{1,j}v_1 + \dots + a_{n,j}v_n$$

In tal caso, si verifica che $A \in GL(n, K)$ e $C = A^{-1}BA$:

(*dimostrazione omessa*)

9.8.1 Invarianti per similitudine**Proposition 76**

Se $A, B \in Mat_{n \times n}(K)$ sono matrici simili, allora

$$\det(A) = \det(B)$$

Dimostrazione:

- Sia $C \in GL(n, K) \mid B = C^{-1}AC$. Siccome $\det(C^{-1}) = \det(C)^{-1}$, si verifica che:

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

Definition 94. Traccia di una matrice

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$, definiamo come **traccia** di A la somma delle entrate sulla diagonale principale:

$$tr(A) = \sum_{k=1}^n a_{k,k}$$

Observation 59

Date $A \in Mat_{m \times n}(K)$ e $B \in Mat_{n \times m}(K)$, si verifica che:

$$tr(AB) = tr(BA)$$

Dimostrazione:

- Il risultato segue dalla definizione stessa di prodotto tra matrici:

$$\operatorname{tr}(AB) = \sum_{k=1}^n (ab)_{k,k} = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_{k,j} b_{j,k} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n b_{j,k} a_{k,j} = \sum_{k=1}^n (ba)_{k,k} = \operatorname{tr}(BA)$$

Proposition 77

Se $A, B \in \operatorname{Mat}_{n \times n}(K)$ sono matrici simili, allora

$$\operatorname{tr}(A) = \operatorname{tr}(B)$$

Dimostrazione:

- Se $\exists C \in GL(n, K) \mid B = C^{-1}AC$, allora

$$\operatorname{tr}(B) = \operatorname{tr}(C^{-1}AC) = \operatorname{tr}(C^{-1}CA) = \operatorname{tr}(A)$$

Definition 95. Polinomio caratteristico

Data una matrice $A \in \operatorname{Mat}_{n \times n}(K)$, definiamo come **polinomio caratteristico** di A come:

$$p_A(x) := \det(xI_n - A)$$

Esempio:

- Data la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$$

il suo polinomio caratteristico corrisponde a:

$$p_A(x) = \det \left(\begin{pmatrix} x & 0 \\ 0 & x \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \right) = \det \begin{pmatrix} x-1 & -2 \\ -3 & x-4 \end{pmatrix} = x^2 - 5x - 2$$

- Data la matrice

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

il suo polinomio caratteristico corrisponde a:

$$p_A(x) = \det \begin{pmatrix} x-1 & 0 & +1 \\ -2 & x+3 & 0 \\ -1 & 0 & x-1 \end{pmatrix} = (x-3)(x^2 - 2x + 2)$$

Proposition 78

Se $A, B \in Mat_{n \times n}(K)$ sono matrici simili, allora

$$p_A(x) = p_B(x)$$

Dimostrazione:

- Se $\exists C \in GL(n, K) \mid B = C^{-1}AC$, allora

$$\begin{aligned} p_B(x) &= \det(xI_n - B) = \det(xI_n - C^{-1}AC) = \det(xC^{-1}C - C^{-1}AC) = \\ &= \det(C^{-1}xI_nC - C^{-1}AC) = \det(C^{-1}(xI_n - A)C) = \det(C^{-1})\det(xI_n - A)\det(C) = \\ &= \det(C)^{-1}\det(xI_n - A)\det(C) = \det(xI_n - A) = p_A(x) \end{aligned}$$

Observation 60

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$, si verifica che:

$$p_A(x) = x^n - \text{tr}(A)x^{n-1} + \dots + (-1)^n \det(A)$$

Definition 96. Autovalori ed Autovettori

Data $A \in Mat_{n \times n}$ e uno scalare $\lambda \in K$, le seguenti condizioni sono equivalenti:

1. $p_A(\lambda) = 0$
2. $\exists v \neq 0_{K^n} \in K^n \mid Av = \lambda v$

Definiamo quindi come **autovalori** della matrice le radici del polinomio caratteristico di A . Se $\lambda \in K$ è un autovalore di A , allora definiamo **autovettore** relativo a λ una qualunque soluzione $v \neq 0_{K^n}$ del sistema:

$$(\lambda I_n - A)v = 0 \quad \text{oppure} \quad (A - \lambda I_n)v = 0$$

Dimostrazione:

- Notiamo come

$$\exists v \in K^n \mid Av = \lambda v \iff \begin{cases} 0 = \lambda v - Av \iff 0 = (\lambda I_n - A)v \\ Av - \lambda v = 0 \iff (A - \lambda I_n)v = 0 \end{cases}$$

- Poiché $(\lambda I_n - A) \cdot 0_{K^n} = 0_{K^n}$, esiste sempre una soluzione banale del sistema.
- Supponiamo quindi che esista $\exists v \neq 0_{K^n} \in K^n \mid Av = \lambda v$:

$$\begin{aligned} \exists v \neq 0_{K^n} \in K^n \mid (\lambda I_n - A)v = 0 &\iff \text{Ker}(L_{(\lambda I_n - A)}) \neq \{0_{K^n}\} \iff \\ &\iff \dim(\text{Ker}(L_{(\lambda I_n - A)})) > 0 \iff \text{rk}(\lambda I_n - A) = n - \dim(\text{Ker}(L_{(\lambda I_n - A)})) < n \iff \\ &\iff \det(\lambda I_n - A) = 0 \iff p_A(\lambda) = 0 \end{aligned}$$

Definition 97. Spettro e Autospazio relativo

Data una matrice $A \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$, definiamo come **spettro** di A l'insieme dei suoi autovalori

$$Sp(A) = \{\lambda \in K \mid p_A(\lambda) = 0\}$$

e come **autospazio relativo a λ** il sottospazio di A generato dagli autovettori relativi a λ :

$$E_\lambda(A) = \{v \in K^n \mid Av = \lambda v\}$$

Proposition 79

Se $A, B \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$ sono matrici simili, allora

$$Sp(A) = Sp(B)$$

Inoltre, dato $\lambda \in Sp(A) = Sp(B)$ si ha che:

$$E_\lambda(A) = E_\lambda(B) \iff A = B$$

Dimostrazione:

- Se $\exists C \in GL(n, K) \mid B = C^{-1}AC$, allora $p_A(x) = p_B(x)$, dunque si ha che:

$$\mu \in Sp(A) \iff p_A(\mu) = p_B(\mu) = 0 \iff \mu \in Sp(B)$$

- Dato $\lambda \in Sp(A) = Sp(B)$, supponiamo che $E_\lambda(A) = E_\lambda(B)$. Ne segue quindi che:

$$E_\lambda(A) = E_\lambda(B) \iff \exists v \in K^n \mid Av = \lambda v = Bv \iff Av = Bv \iff A = B$$

Esempio:

- Consideriamo la seguente matrice

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 0 & -5 \\ -2 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

- Il suo polinomio caratteristico corrisponde a:

$$p_A(x) = \det \begin{pmatrix} x-1 & -1 & -3 \\ -1 & x & 5 \\ 2 & -1 & x-2 \end{pmatrix} = x(x-1)(x-2)$$

dunque otteniamo che $Sp(A) = \{0, 1, 2\}$

- Gli autovettori dell'autospazio $E_0(A)$ corrispondono a:

$$v = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in E_0(A) \iff (0 \cdot I_n - A)v = 0 \iff \begin{cases} -x - y - 3z = 0 \\ -x + 5z = 0 \\ 2x + y - 2z = 0 \end{cases} \iff$$

$$\iff \begin{cases} x = 5t \\ y = -8t \\ z = t \end{cases} \iff \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} 5 \\ -8 \\ 1 \end{pmatrix}, t \neq 0$$

- Gli autovettori dell'autospazio $E_1(A)$ corrispondono a:

$$v = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in E_1(A) \iff (1 \cdot I_n - A)v = 0 \iff \begin{cases} -y - 3z = 0 \\ -x + y + 5z = 0 \\ 2x + y - z = 0 \end{cases} \iff$$

$$\iff \begin{cases} x = 2t \\ y = -3t \\ z = t \end{cases} \iff \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ 1 \end{pmatrix}, t \neq 0$$

- Gli autovettori dell'autospazio $E_2(A)$ corrispondono a:

$$v = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in E_0(A) \iff (2 \cdot I_n - A)v = 0 \iff \begin{cases} x - y - 3z = 0 \\ -x + 2y + 5z = 0 \\ 2x + y = 0 \end{cases} \iff$$

$$\iff \begin{cases} x = t \\ y = -2t \\ z = t \end{cases} \iff \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}, t \neq 0$$

Definition 98. Molteplicità algebrica e geometrica

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$, per ogni autovalore $\lambda \in Sp(A)$ definiamo la sua:

- **Molteplicità algebrica** $\mu(\lambda)$, ossia la sua molteplicità come radice del polinomio caratteristico $p_A(x)$, corrispondente al più grande intero tale che:

$$\mu(\lambda) \in \mathbb{N}, (x - \lambda)^{\mu(\lambda)} \mid p_A(x)$$

- **Molteplicità geometrica** $\nu(\lambda)$, ossia la dimensione del suo autospazio relativo, corrispondente a:

$$\nu(\lambda) = \dim(E_\lambda(A)) = n - rk(\lambda I_n - A)$$

Per ogni $\lambda \in Sp(A)$, si verifica che:

$$1 \leq \nu(\lambda) \leq \mu(\lambda)$$

Proposition 80

Se $A, B \in Mat_{n \times n}(K)$ sono matrici simili, allora $\forall \lambda \in Sp(A) = Sp(B)$ si ha che:

$$\mu_A(\lambda) = \mu_B(\lambda) \quad \nu_A(\lambda) = \nu_B(\lambda)$$

9.8.2 Diagonalizzazione di una matrice**Definition 99. Matrice diagonale**

Sia $A \in Mat_{n \times n}(K)$. Tale matrice viene detta **diagonale** se $\forall i \neq j$ si ha che $a_{i,j} = 0$, ossia se sopra e sotto la diagonale principale vi sono tutti zeri

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & a_{2,2} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & a_{n-1,n-1} & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & a_{n,n} \end{pmatrix}$$

In altre parole, una matrice viene detta diagonale se è sia triangolare superiore sia triangolare inferiore.

Definition 100. Matrici triangolarizzabili e diagonalizzabili

Una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$ viene detta **triangolarizzabile** se simile ad una matrice triangolare $T \in Mat_{n \times n}(K)$, mentre viene detta **diagonalizzabile** se simile ad una matrice diagonale $D \in Mat_{n \times n}(K)$

Proposition 81

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$, le seguenti affermazioni sono equivalenti:

1. A è triangolarizzabile
2. La somma di tutte le sue molteplicità algebriche è n :

$$\sum_{\lambda \in Sp(A)} \mu(\lambda) = n = \dim(K^n)$$

3. Il suo polinomio caratteristico è completamente fattorizzabile:

$$p_A(x) = \prod_{\lambda \in Sp(A)} (x - \lambda)^{\mu(\lambda)}$$

Corollary 27

Per il teorema fondamentale dell'algebra, ne segue che ogni matrice $A \in Mat_{n \times n}(\mathbb{C})$ è triangolarizzabile.

Analogamente, ne segue che $A \in Mat_{n \times n}(\mathbb{R})$ è triangolarizzabile se e solo se

$$\lambda \in Sp(A) \implies \lambda \in \mathbb{R} \implies Sp(A) \subseteq \mathbb{R}$$

Esempio:

- Data la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \in Mat_{2 \times 2}(\mathbb{R})$$

il suo polinomio caratteristico corrisponde a:

$$p_A(x) = \det \begin{pmatrix} x & 1 \\ -1 & x \end{pmatrix} = x^2 + 1$$

- Siccome $p_A(x) \in \mathbb{R}[x]$, $\deg(p_A(x)) = 2$ e $\Delta_{p_A(x)} < 0$, tale polinomio non è fattorizzabile, dunque A non è triangolarizzabile
- Se invece consideriamo la matrice $A' \in Mat_{2 \times 2}(\mathbb{C})$ avente entrate coincidenti a quelle di A , otteniamo che:

$$p_{A'}(x) = (x - i)(x + i) \in \mathbb{C}[x] \implies Sp(A') = \{\pm i\} \subseteq \mathbb{C}$$

dunque A' è triangolarizzabile

Proposition 82

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$, le seguenti affermazioni sono equivalenti:

1. A è diagonalizzabile
2. La somma di tutte le sue molteplicità geometriche è n :

$$\sum_{\lambda \in Sp(A)} \nu(\lambda) = n = \dim(K^n)$$

3. Esiste una base B^1, \dots, B^n di K^n tale che:

$$\lambda_1, \dots, \lambda_n \in Sp(A) \implies B^1 \in E_{\lambda_1}(A), \dots, B^n \in E_{\lambda_n}(A)$$

4. Il suo spettro contiene n autovalori diversi tra loro:

$$Sp(A) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}, \forall i \neq j \mid \lambda_i \neq \lambda_j$$

Observation 61

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$ e dati $v_1 \in E_{\lambda_1}(A), \dots, v_k \in E_{\lambda_k}(A)$, se $\forall i \neq j \mid \lambda_i \neq \lambda_j$, allora v_1, \dots, v_k sono linearmente indipendenti

Proposition 83. Matrice diagonalizzante

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(K)$, se esiste una base B^1, \dots, B^n di K^n tale che:

- B^1 è base di $E_{\lambda_1}(A)$
- \vdots
- B^n è base di $E_{\lambda_n}(A)$

dove $\lambda_k \in Sp(A)$ e dove $\forall i \neq j \mid \lambda_i \neq \lambda_j$, allora:

$$\exists B = (B^1, \dots, B^n) \in GL(n, K) \mid D = B^{-1}AB$$

dove $D \in Mat_{n \times n}(K)$ è una matrice diagonale e dove B viene detta **matrice diagonalizzante**.

Esempio:

1. • Consideriamo la seguente matrice

$$A = \begin{pmatrix} 5 & -8 & 3 \\ 4 & -8 & 4 \\ 5 & -12 & 7 \end{pmatrix} \in Mat_{3 \times 3}(\mathbb{R})$$

- Il suo polinomio caratteristico corrisponde a:

$$\begin{aligned} p_A(x) &= \det \begin{pmatrix} x-5 & 8 & -3 \\ -4 & x+8 & -4 \\ -5 & 12 & x-7 \end{pmatrix} = \\ &= (x-5) \det \begin{pmatrix} x+8 & -4 \\ 12 & x-7 \end{pmatrix} + 4 \det \begin{pmatrix} 8 & -3 \\ 12 & x-7 \end{pmatrix} - 5 \det \begin{pmatrix} 8 & -3 \\ x+8 & -4 \end{pmatrix} = \\ &= (x-5)(x^2 + x - 8) + 4(8x - 20) - 5(3x - 8) = x^3 - 4x^2 + 4x = x(x-2)^2 \end{aligned}$$

dunque sappiamo che A è triangolarizzabile e che il suo spettro è $Sp(A) = \{0, 2\}$.

- Siccome affinché A sia anche diagonalizzabile è necessario che $\nu(0) + \nu(2) = 3 = \dim(\mathbb{R}^3)$, notiamo come:

$$1 \leq \nu(0) \leq \mu(0) \iff 1 \leq \nu(0) \leq 1 \iff \nu(0) = 1$$

di conseguenza, si ha che:

$$\nu(0) + \nu(2) = 3 \iff 1 + \nu(2) = 3 \iff \nu(2) = 2$$

- Consideriamo quindi il sistema $(2 \cdot I_n - A)v = 0$:

$$\begin{cases} -3x + 8y - 3z = 0 \\ -4x + 10y - 4z = 0 \\ -5x + 12y - 5z = 0 \end{cases} \implies (2 \cdot I_n - A) = \begin{pmatrix} -3 & 8 & -3 \\ -4 & 10 & -4 \\ -5 & 12 & -5 \end{pmatrix}$$

Si ha che:

$$\nu(2) = 2 = \dim(E_2(A)) = 3 - rk(2 \cdot I_n - A) = \iff rk(2 \cdot I_n - A) = 1$$

- Tuttavia, considerando il minore $M_{3,3}$, per il teorema degli orlati si verifica che:

$$\det \begin{pmatrix} -3 & 8 \\ -4 & 10 \end{pmatrix} = -30 + 32 = 2 \neq 0 \implies rk(2 \cdot I_n - A) \geq 2$$

Dunque si ha che $rk(2 \cdot I_n - A) \neq 1$, implicando quindi che A non sia diagonalizzabile.

- Difatti, si ha che:

$$1 \leq \nu(2) = 3 - rk(2 \cdot I_n - A) \leq 3 - 2 = 1 \iff \nu(2) = 1$$

e dunque che:

$$\nu(0) + \nu(2) = 1 + 1 = 2 \neq 3 = \dim(\mathbb{R}^3)$$

2. • Consideriamo la seguente matrice

$$A = \begin{pmatrix} 1 & k \\ 2 & k-1 \end{pmatrix} \in Mat_{2 \times 2}(\mathbb{R})$$

- Il suo polinomio caratteristico corrisponde a:

$$\begin{aligned} p_A(x) &= \det \begin{pmatrix} x-1 & -k \\ -2 & x-k-1 \end{pmatrix} = (x-1)(x-k-1) - 2k \\ &= x^2 - kx - k - 1 = (x+1)(x-k-1) \end{aligned}$$

dunque si ha che $Sp(A) = \{-1, k+1\}$

- Siccome $p_A(x)$ è completamente fattorizzabile indipendentemente dal valore assunto da k , allora A è sempre triangolarizzabile.
- Se $k = -2$, si ha che:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 2 & -3 \end{pmatrix} \implies p_A(x) = (x+1)^2 \implies Sp(A) = \{-1\}$$

Dunque A è diagonalizzabile se e solo se $\nu(-1) = 2$.

Tuttavia, considerando il sistema $(-1 \cdot I_n - A)v = 0$, notiamo che :

$$\begin{aligned} \begin{cases} -2x + 2y = 0 \\ -2x + 2y = 0 \end{cases} &\iff \{ x = ty = t \} \iff \\ \iff \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= t \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \implies \nu(-1) = \dim(E_{-1}(A)) = 1 \end{aligned}$$

Dunque A non è diagonalizzabile se $k = -2$

- Se invece $k \neq -2$, si ha che:

$$p_A(x) = (x+1)(x-k-1) \implies Sp(A) = \{-1, k+1\}$$

Dunque A è diagonalizzabile, poiché vi sono 2 autovalori distinti.

- Difatti, notiamo come considerando il sistema $(-1 \cdot I_n - A)v = 0$ si ha che :

$$\begin{aligned} \begin{cases} -2x + ky = 0 \\ -2x + ky = 0 \end{cases} &\iff \{ x = ty = -\frac{k}{2}t \} \iff \\ \iff \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= t \begin{pmatrix} 1 \\ -\frac{k}{2} \end{pmatrix} \implies \nu(-1) = \dim(E_{-1}(A)) = 1 \end{aligned}$$

mentre per il sistema $((k+1) \cdot I_n - A)v = 0$ si ha che :

$$\begin{aligned} \begin{cases} kx - ky = 0 \\ -2x + 2y = 0 \end{cases} &\iff \{ x = ty = t \} \iff \\ \iff \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= t \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \implies \nu(k+1) = \dim(E_{k+1}(A)) = 1 \end{aligned}$$

dunque si ha che $\nu(-1) + \nu(k+1) = 2 = \dim(\mathbb{R}^2)$

- Inoltre, otteniamo che i due vettori trovati sono base della matrice diagonalizzante B :

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -\frac{k}{2} & 1 \end{pmatrix} \implies D = B^{-1}AB \implies D = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & k+1 \end{pmatrix}$$

9.9 Matrici ortogonali

Definition 101. Base ortogonale

Siano v_1, \dots, v_n una base di \mathbb{R}^n , tale base viene detta **ortogonale** se i vettori sono a due a due perpendicolari, dunque se

$$\forall i \neq j, v_i \cdot v_j = 0$$

Definition 102. Base ortonormale

Siano v_1, \dots, v_n una base di \mathbb{R}^n , tale base è detta **ortonormale** se sono ortogonali e sono **versori**, ossia aventi norma pari ad 1, dunque se:

$$v_i \cdot v_j = \delta_{ij} = \begin{cases} \|v_i\| = 1 & \text{se } i = j \\ 0 & \text{se } i \neq j \end{cases}$$

dove δ_{ij} viene detto **delta di Kroneker**.

Observation 62

Le basi ortonormali possono essere ottenute da dalla base canonica e_1, \dots, e_n attraverso rotazioni e riflessioni

Observation 63

Data una base ortonormale $\mathcal{B} = v_1, \dots, v_n$ di \mathbb{R}^n e dato un vettore $w \in \mathbb{R}^n$, le coordinate di w nella base \mathcal{B} corrispondono a:

$$w = (w \cdot v_1) \cdot v_1 + \dots + (w \cdot v_n) \cdot v_n$$

Proposition 84

Data una matrice $A \in Mat_{n \times n}(\mathbb{R})$, le seguenti affermazioni sono equivalenti:

1. Le colonne A^1, \dots, A^n sono base ortogonale di \mathbb{R}^n
2. Le righe A_1, \dots, A_n sono base ortogonale di \mathbb{R}^n
3. $A^T \cdot A = I_n \iff A \in GL(n, \mathbb{R}) \mid A^{-1} = A^T$
4. $L_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ è isometria, ossia non cambia la distanza tra i punti del piano

Definition 103. Matrice ortogonale

Data una matrice $A \in Mat_{n \times m}(\mathbb{R})$, tale matrice viene detta **ortogonale** se A^1, \dots, A^n o A_1, \dots, A_n sono base ortonormale di \mathbb{R}^n

Corollary 28. Gruppo ortogonale

Definiamo come **gruppo ortogonale**, indicato come $O(n)$, il sottogruppo di $GL(n, \mathbb{R})$ contenente tutte le matrici ortogonali di ordine n :

$$O(n) = \{A \in GL(n, \mathbb{R}) \mid A^{-1} = A^T\}$$

Method 9. Algoritmo di Gram-Schmidt

Data una base v_1, \dots, v_n di \mathbb{R}^n , è possibile ottenere una base ortonormale di \mathbb{R}^n tramite il seguente algoritmo:

1. Preso $w_1 \in \mathbb{R}^n \mid \|w_1\| = 1$ e stessa direzione di v_1 , si ha che:

$$w_1 = \frac{v_1}{\|v_1\|} = \frac{v_1}{v_1 \cdot v_1} = \frac{1}{v_1} \iff w_1 \cdot v_1 = 1$$

dunque w_1, v_2, \dots, v_n sono base di \mathbb{R}^n

2. Poniamo $u_2 := v_2 - (v_2 \cdot w_1)w_1$, geometricamente equivalente alla proiezione di v_2 sulla retta perpendicolare a quella di w_1 . In tal modo, si ha che:

$$u_2 = v_2 - (v_2 \cdot w_1)w_1 \implies u_2 \cdot v_1 = v_2 \cdot v_1 - (v_2 \cdot w_1)w_1 \cdot v_1 = 0$$

dunque u_2 e v_1 sono perpendicolari

3. Ripetendo il punto 1) e 2), all' i -esima iterazione si ha che $w_1, \dots, w_{i-1}, v_i, \dots, v_n$ sono base di \mathbb{R}^n . Poniamo quindi

$$u_i := v_i - \sum_{j < i} (v_i \cdot w_j)w_j \implies u_i \cdot w_j = 0, \forall j < i$$

da cui ne segue che:

- $\|w_1\| = \dots = \|w_i\| = 1$
- e $w_j \cdot w_h = 0, \forall 1 \leq j, h \leq i$
- $Span(w_1, \dots, w_i) = Span(v_1, \dots, v_i)$

4. Dopo n iterazioni otteniamo una base ortogonale w_1, \dots, w_n di \mathbb{R}^n

Definition 104. Matrice simmetrica

Data una matrice $A \in \text{Mat}_{n \times n}(K)$, tale matrice viene detta **simmetrica** se

$$A = A^T$$

Theorem 85. Teorema spettrale

Data una matrice simmetrica $S \in \text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{R})$, le seguenti affermazioni sono equivalenti:

1. $\text{Sp}(S) \subset \mathbb{R}$
2. S è diagonalizzabile
3. Esiste una base ortonormale $\mathcal{B} = B^1, \dots, B^n$ di \mathbb{R}^n tale che B^i, \forall è autovettore di S
4. $\exists B \in O(n) \mid D = B^{-1}AB = B^T A B$ dove $D \in \text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{R})$ è una matrice diagonale