

Combinatoria Algebrica

Appunti

Innamorato Italiano e Innamorata Giapponese

Contents

Chapter	Section	Page
Chapter 1	Fondamenti di Algebra Astratta per Informatici	Page
1.1	Gruppi Centro di un Gruppo — • Sottogruppi Normali — • Gruppi Simmetrici e Gruppi Lineari Generali — • Gruppi Ciclici — • Azioni —	
1.2	Campo Proprieta' Fondamentali —	
1.3	Anelli Proprieta' fondamentali —	
1.4	Spazio Vettoriale	
1.5	Morfismi di Strutture Algebriche Omomorfismi — • Isomorfismi — • Automorfismi —	
1.6	L'Omomorfismo Determinante	
Chapter 2	Fondamenti della Teoria delle Rappresentazioni	Page
2.1	Rappresentazioni e Sottorappresentazioni	

Chapter 1

Fondamenti di Algebra Astratta per Informatici

Vediamo le strutture algebriche principali e i morfismi utilizzati nel corso. Notiamo come sta roba non ce la sta a spiegare nessuno se non il sommo Gem, dato che appunto siamo informatici.

1.1 Gruppi

Definition 1.1.1: Gruppo

E' una coppia (G, \cdot) dove:

- G e' un insieme non vuoto
- \cdot e' un'operazione $G \times G \rightarrow G$ (chiusa su G)

Che soddisfa gli assiomi:

- **Associativita'**
- Esistenza dell'elemento *neutro* e
- Esistenza dell'*inverso* a^{-1} per ogni $a \in G$

Alcune delle proprietà più importanti dei gruppi sono:

- **Unicità** dell'elemento inverso e neutro
- **Inverso del prodotto:** $(a \cdot b)^{-1} = b^{-1} \cdot a^{-1}$
- **Legge della cancellazione:** $a \cdot b = a \cdot c$ moltiplicando a sx per a^{-1} si ottiene $b = c$

Note:

Se vale anche la proprietà *commutativa*, allora il gruppo si dice *abeliano*.

Vediamo ora cosa sono i sottogruppi:

Definition 1.1.2: Sottogruppo

Dato un gruppo (G, \cdot) , si dice che B è un suo sottogruppo se:

- $B \subset G$
- (B, \cdot) è un gruppo

Un importante teorema per i sottogruppi: TODO finisci

Theorem 1.1.1 Lagrange

Se G è un gruppo finito e H un suo sottogruppo, allora la cardinalità degli elementi di G divide esattamente

1.1.1 Centro di un Gruppo

Definition 1.1.3: Centro di un Gruppo

Sia G un gruppo. Il **centro** di G , tipicamente denotato con $Z(G)$, è l'insieme di tutti gli elementi di G che commutano con ogni elemento del gruppo stesso. In simboli:

$$Z(G) = \{z \in G \mid z \cdot g = g \cdot z, \forall g \in G\}$$

Note:

Proprietà fondamentali ed Esempi:

- **È un sottogruppo:** L'elemento neutro e commuta con tutto, quindi $e \in Z(G)$. Essendo chiuso rispetto al prodotto e all'inverso, costituisce un sottogruppo a tutti gli effetti ($Z(G) \leq G$).
- **È un sottogruppo normale:** Poiché ogni elemento $z \in Z(G)$ commuta con tutti i $g \in G$, la coniugazione lo lascia invariato: $gzg^{-1} = zgg^{-1} = z \in Z(G)$. Di conseguenza, $Z(G) \trianglelefteq G$.
- **Casi limite:** Se G è abeliano, il centro coincide con tutto il gruppo ($Z(G) = G$). Se invece $Z(G) = \{e\}$, si dice che il gruppo ha centro banale (es. il gruppo simmetrico S_n per $n \geq 3$).
- **Applicazione in Combinatoria Algebrica:** Il centro del gruppo generale lineare $GL(V)$ è costituito esattamente dalle matrici scalari non nulle ($Z = \{\lambda I \mid \lambda \in K^\times\}$). Questo fatto è il motore logico della dimostrazione del **Lemma di Schur**.

1.1.2 Sottogruppi Normali

Dobbiamo prima definire un'operazione che ci servirà'

Definition 1.1.4: Operazione di Coniugio

Sia G un gruppo e siano $x, g \in G$. Si definisce **coniugio** di x tramite g l'operazione che associa ad x l'elemento:

$$x^g = gxg^{-1}$$

Due elementi $x, y \in G$ si dicono **coniugati** se esiste un elemento $g \in G$ tale che $y = gxg^{-1}$. Questa è una relazione di equivalenza che partiziona il gruppo in **classi di coniugio**.

Note:

Osservazioni e Proprietà:

- **Automorfismo Interno:** Per ogni $g \in G$, la mappa $\gamma_g : G \rightarrow G$ definita da $\gamma_g(x) = gxg^{-1}$ è un automorfismo del gruppo (chiamato automorfismo interno). Questo significa che il coniugio preserva tutte le proprietà algebriche dell'elemento (ad esempio, x e gxg^{-1} hanno sempre lo stesso ordine).
- **Nei Gruppi Abeliani:** Se G è commutativo, il coniugio è banale: $gxg^{-1} = xgg^{-1} = x$. In questo caso, ogni elemento forma una classe di coniugio a sé stante.
- **Invarianza dei Caratteri:** Questa è la proprietà più importante per il Modulo 2. I caratteri di una rappresentazione sono **funzioni di classe**, ovvero assumono lo stesso valore su tutti gli elementi di una stessa classe di coniugio: $\chi(x) = \chi(gxg^{-1})$.
- **Legame con la Normalità:** Un sottogruppo N è normale ($N \trianglelefteq G$) se e solo se è un'unione di classi di coniugio, ovvero se è "chiuso" rispetto all'operazione di coniugio.

Possiamo ora definire cosa sono i sottogruppi normali

Definition 1.1.5: Sottogruppo Normale

Sia G un gruppo e N un suo sottogruppo ($N \leq G$). Diciamo che N è un **sottogruppo normale** di G , e si denota con il simbolo $N \trianglelefteq G$, se è invariante rispetto all'operazione di coniugio per qualsiasi elemento del gruppo. In formule, deve valere:

$$gng^{-1} \in N \quad \forall n \in N, \forall g \in G$$

Note:

Condizioni Equivalenti Nella pratica algebrica, dire che $N \trianglelefteq G$ equivale a verificare una di queste due proprietà:

- **Invarianza globale per coniugio:** $gNg^{-1} = N$ per ogni $g \in G$.
- **Coincidenza dei laterali:** I laterali sinistri coincidono sempre con i laterali destri. Ovvero, $gN = Ng$ per ogni $g \in G$. (Attenzione: questo non significa che gli elementi commutino individualmente, cioè $gn = ng$, ma che gli *insiemi* risultanti siano identici).

Esempi e Proprietà Fondamentali

- **Gruppi Abeliani:** Se il gruppo G è commutativo (come i gruppi ciclici o il Gruppo di Klein V_4), allora *ogni* suo sottogruppo è banalmente normale, poiché $gng^{-1} = ngg^{-1} = n$.
- **Nucleo di un Omomorfismo:** Il nucleo di un qualsiasi omomorfismo $\phi : G \rightarrow H$ è sempre un sottogruppo normale di G ($\ker(\phi) \trianglelefteq G$).
- **Il Centro del Gruppo:** Il centro $Z(G)$, contenendo gli elementi che commutano con tutto, è sempre un sottogruppo normale di G .

Il Fine Ultimo: Il Gruppo Quoziente La normalità è la condizione necessaria e sufficiente per poter definire un'operazione coerente sull'insieme dei laterali $\{gN \mid g \in G\}$. Solo se $N \trianglelefteq G$, il prodotto $(aN) \cdot (bN) = (ab)N$ è ben definito. Questo ci permette di creare il **Gruppo Quoziente** G/N , una struttura fondamentale che "semplifica" il gruppo di partenza collassando tutto il sottogruppo N nell'elemento neutro.

1.1.3 Gruppi Simmetrici e Gruppi Lineari Generali

Definition 1.1.6: Il Gruppo Simmetrico

Sia X un insieme. Il **Gruppo Simmetrico** di X , denotato con $Sym(X)$ o $Perm(X)$, è l'insieme di tutte le funzioni biunivoche (permutazioni) $f : X \rightarrow X$. Sotto l'operazione di composizione di funzioni, $Sym(X)$ forma un gruppo.

Note:

Si puo' dimostrare che gruppi simmetrici di insiemi aventi la stessa cardinalita' n sono isomorfi, quindi si tende a considerare il gruppo simmetrico costituito dalle permutazioni degli interi $1, 2, \dots, n$ denotato S_n .

Definition 1.1.7: Il Gruppo Lineare Generale di uno Spazio Vettoriale

Sia V uno spazio vettoriale su un campo K . Il **Gruppo Lineare Generale** di V , denotato con $GL(V)$ o $\text{Aut}(V)$, è l'insieme di tutti gli **automorfismi lineari** dello spazio V (ovvero, tutte le applicazioni lineari biunivoche $f : V \rightarrow V$).

La struttura $(GL(V), \circ)$ forma un gruppo dove l'operazione interna è la **composizione di funzioni**:

- **Chiusura:** La composizione di due automorfismi lineari è ancora un automorfismo lineare.
- **Elemento neutro:** L'applicazione identica id_V (tale che $\text{id}_V(v) = v, \forall v \in V$).
- **Inverso:** L'applicazione lineare inversa f^{-1} , che esiste sempre ed è unica poiché f è una biiezione.

Note:

Distinzione tra $Sym(V)$ e $GL(V)$:

- **Natura delle trasformazioni:** Mentre $Sym(V)$ contiene *qualsiasi* funzione biettiva (anche quelle che "rimescolano" i vettori in modo selvaggio e non lineare), il gruppo $GL(V)$ è il sottogruppo di $Sym(V)$ costituito solo dalle trasformazioni che sono anche **lineari**.
- **Inclusione:** $GL(V) \leq Sym(V)$. In termini di Teoria delle Rappresentazioni, diciamo che una rappresentazione è un'azione di G su V tale che l'immagine dell'omomorfismo non sia semplicemente in $Sym(V)$, ma sia contenuta interamente in $GL(V)$.
- **Esempio concettuale:** Se $V = \mathbb{R}^2$, una funzione che sposta il vettore $(1, 1)$ in $(2, 2)$ e il vettore $(2, 2)$ in $(5, 0)$ può appartenere a $Sym(V)$ (se è biettiva), ma non potrà mai appartenere a $GL(V)$ perché non rispetta la proporzionalità (linearità).
- **Il "filtro" della Rappresentazione:** Quando scriviamo $\rho : G \rightarrow GL(V)$, stiamo imponendo che ogni simmetria del gruppo G agisca sullo spazio V rispettando la sua struttura vettoriale (somma e prodotto per scalare), non solo come un semplice rimescolamento di punti.

Rappresentazione Matriciale $GL(n, K)$

Se lo spazio vettoriale V ha dimensione finita n , fissata una base di V , ogni isomorfismo lineare può essere rappresentato univocamente da una matrice quadrata di ordine n . Di conseguenza, $GL(V)$ è isomorfo al gruppo delle matrici invertibili a coefficienti nel campo K :

$$GL(n, K) = \{A \in M_n(K) \mid \det(A) \neq 0\}$$

In questa veste, l'operazione del gruppo diventa la **moltiplicazione riga per colonna** tra matrici e l'elemento neutro è la matrice identità I_n .

Proprietà Fondamentali

1. **Non Abelianità:** Se la dimensione $n \geq 2$, il gruppo $GL(V)$ è tipicamente **non commutativo** (poiché il prodotto di matrici non commuta in generale).
2. **Il Centro del Gruppo:** Il centro $Z(GL(V))$ (ovvero l'insieme degli elementi che commutano con ogni altro elemento del gruppo) è costituito esattamente dalle **matrici scalari** non nulle: $Z = \{\lambda I_n \mid \lambda \in K^\times\}$. Questo fatto è il motore logico del **Lemma di Schur**.
3. **Sottogruppo Speciale Lineare:** Il nucleo dell'omomorfismo determinante ($\det : GL(n, K) \rightarrow K^\times$) forma un importante sottogruppo normale di $GL(n, K)$, chiamato *Gruppo Speciale Lineare* $SL(n, K)$, composto da tutte e sole le matrici con determinante uguale a 1.

Il Ruolo Centrale nel Modulo 2

Questa definizione è il perno del corso di Combinatoria Algebrica. Definire una rappresentazione di un gruppo finito astratto G su uno spazio vettoriale V significa esattamente stabilire un omomorfismo:

$$\rho : G \rightarrow GL(V)$$

Stiamo, di fatto, "traducendo" la struttura moltiplicativa del gruppo astratto G in operazioni tra matrici invertibili, permettendoci così di sfruttare tutta la potenza dell'Algebra Lineare (autovalori, traccia, diagonalizzazione) per studiare le simmetrie del gruppo.

1.1.4 Gruppi Ciclici

Definition 1.1.8: Gruppo Ciclico

Un gruppo (G, \cdot) si dice **ciclico** se esiste un elemento $g \in G$, detto **generatore**, tale che ogni elemento di G possa essere espresso come potenza intera di g :

$$G = \langle g \rangle = \{g^k \mid k \in \mathbb{Z}\}$$

Classificazione e Struttura

I gruppi ciclici sono classificati in base al loro ordine $|G|$:

- Se $|G| = \infty$, allora $G \cong (\mathbb{Z}, +)$.
- Se $|G| = n < \infty$, allora $G \cong (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$, ovvero il gruppo delle classi di resto modulo n .

Proprietà Fondamentali

1. **Abelianità:** Ogni gruppo ciclico è abeliano. Infatti, $g^a \cdot g^b = g^{a+b} = g^{b+a} = g^b \cdot g^a$.
2. **Sottogruppi:** Ogni sottogruppo di un gruppo ciclico è a sua volta ciclico.
3. **Teorema dei Divisori:** Se G è un gruppo ciclico di ordine n , allora per ogni divisore d di n esiste un unico sottogruppo $H \leq G$ tale che $|H| = d$.
4. **Generatori:** Un elemento g^k di un gruppo ciclico d'ordine n è un generatore di G se e solo se $\gcd(k, n) = 1$. Il numero di tali generatori è dato dalla funzione $\varphi(n)$ di Eulero.

Definition 1.1.9: Classi di Coniugio di Gruppi Simmetrici

Dato un gruppo simmetrico S_n , due permutazioni $\sigma, \tau \in S_n$ appartengono alla stessa **classe di coniugio** se e solo se hanno la stessa **struttura ciclica**, ovvero se presentano lo stesso numero di cicli della stessa lunghezza nella loro scomposizione in cicli disgiunti.

Note:

Proprietà e Relazione con le Partizioni:

- **Corrispondenza biunivoca:** Le classi di coniugio di S_n sono in corrispondenza biunivoca con le **partizioni** dell'intero n . Una partizione $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$ tale che $\sum \lambda_i = n$ definisce univocamente una classe di coniugio.
- **Numero di Rappresentazioni:** In virtù della teoria generale, il numero di rappresentazioni irriducibili distinte di S_n su \mathbb{C} è esattamente uguale al numero di partizioni $p(n)$.
- **Esempio S_3 ($n = 3$):** Le partizioni di 3 sono:
 - $(1, 1, 1) \rightarrow$ Identità (cicli di lunghezza 1).
 - $(2, 1) \rightarrow$ Trasposizioni $\{(12), (13), (23)\}$.

– (3) \rightarrow 3-cicli $\{(123), (132)\}$.

- **Rappresentazioni Notevoli:** Ogni S_n possiede sempre almeno due rappresentazioni di grado 1: la *banale* ($\chi(g) = 1$ per ogni g) e la *segnatura* ($\chi(g) = \text{sgn}(g)$).
- **Diagrammi di Young:** Le rappresentazioni irriducibili di S_n vengono classificate e costruite tramite i **Diagrammi di Young**, che sono la rappresentazione grafica delle partizioni di n .

1.1.5 Azioni

Definition 1.1.10: Azione di un Gruppo

Sia G un gruppo e X un insieme non vuoto. Un' **azione** (a sinistra) di G su X è una funzione $\cdot : G \times X \rightarrow X$ che associa a ogni coppia (g, x) un elemento $g \cdot x \in X$, tale che siano soddisfatti i seguenti assiomi:

1. **Identità:** $e \cdot x = x$ per ogni $x \in X$ (dove e è l'elemento neutro di G).
2. **Compatibilità:** $(gh) \cdot x = g \cdot (h \cdot x)$ per ogni $g, h \in G$ e $x \in X$.

Note:

Concetti Chiave e Proprietà:

- **Omomorfismo di Permutazione:** Un'azione di G su X è equivalente a un omomorfismo di gruppi $\phi : G \rightarrow \text{Sym}(X)$. In questo senso, ogni elemento del gruppo viene visto come una permutazione degli elementi di X .
- **Orbita:** L'orbita di un elemento $x \in X$ è l'insieme $G \cdot x = \{g \cdot x \mid g \in G\}$. Le orbite formano una partizione dell'insieme X .
- **Stabilizzatore:** Lo stabilizzatore di $x \in X$ è il sottogruppo $G_x = \{g \in G \mid g \cdot x = x\}$. Contiene tutti gli elementi del gruppo che "lasciano fermo" x .
- **Teorema Orbita-Stabilizzatore:** Se G è finito, la cardinalità dell'orbita di x è data dal numero di laterali dello stabilizzatore: $|G \cdot x| = |G|/|G_x|$.
- **Dall'Azione alla Rappresentazione:** Se l'insieme X è uno spazio vettoriale V e l'azione è lineare (cioè $g \cdot (v + w) = g \cdot v + g \cdot w$ e $g \cdot (\lambda v) = \lambda(g \cdot v)$), allora l'azione è esattamente una **rappresentazione lineare** di G .

1.2 Campo

Definition 1.2.1: Campo

Un **campo** K è una struttura algebrica dotata di due operazioni:

- *Somma:* t.c. $(K, +)$ è un *gruppo abeliano* (con elem neutro 0)
- *Prodotto:* t.c. $(K \setminus \{0\}, \cdot)$ è un *gruppo abeliano* (con elem neutro 1)
- Vale la proprietà distributiva del prodotto rispetto alla somma

Come conseguenza diretta, si ha che l'elemento neutro della somma diventa **elemento assorbente** ($\forall a \in K. a \cdot 0 = 0$). Infatti, se un prodotto è 0 allora è sicuro che almeno uno degli operandi è 0.

1.2.1 Proprieta' Fondamentali

Caratteristica del Campo ($\text{char}(K)$): E' il piu' piccolo intero positivo p tale che sommando l'elemento identità 1 a se' stesso p volte si ottiene 0 (l'elemento neutro) (cioè $1 + \dots + 1 = 0$). Se non esiste un valore p (non si

ritorna mai all'elemento neutro) allora $\text{char}(K) = 0$.

Chiusura Algebrica: Un campo K si dice algebricamente chiuso se ogni polinomio non costante a coefficienti in K ha almeno una radice in K . Il campo \mathbb{C} è algebricamente chiuso, mentre \mathbb{R} non lo è (ad esempio, $x^2 + 1 = 0$).

1.3 Anelli

Definition 1.3.1: Anello

Un anello è una terna $(R, +, \cdot)$, dove R è un insieme dotato di due operazioni binarie interne (somma e prodotto), tale che:

- $(R, +)$ è un *gruppo abeliano*
- (R, \cdot) è un *monoido*:
 - Associatività: $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c), \forall a, b, c \in R$
 - Unità: $\exists 1 \in R \mid a \cdot 1 = 1 \cdot a = a, \forall a \in R$
- Proprieta' distributiva (sx e dx)

Come conseguenza diretta, si ha che l'elemento neutro della somma diventa **elemento assorbente** ($\forall a \in K. a \cdot 0 = 0$). Infatti, se un prodotto è 0 allora è sicuro che almeno uno degli operandi è 0.

Note:

A differenza dei campi, in un anello generale non si richiede che il prodotto sia commutativo ($a \cdot b$ può essere diverso da $b \cdot a$), e non si richiede che ogni elemento non nullo abbia un inverso moltiplicativo (cioè non si può sempre "dividere").

1.3.1 Proprietà fondamentali

Per manipolare gli anelli, definiamo alcune categorie di elementi e strutture interne fondamentali:

- **Divisori dello zero:** Un elemento $a \neq 0$ si dice divisore dello zero se esiste un elemento $b \neq 0$ tale che $a \cdot b = 0$. Si osservi che nei campi questa eventualità non si verifica mai per definizione.
- **Elementi Invertibili (Unità):** Gli elementi di R che possiedono un inverso moltiplicativo formano un gruppo rispetto all'operazione di prodotto, indicato con il simbolo R^\times (o $U(R)$).
- **Ideali:** Un sottoinsieme $I \subseteq R$ è un **ideale sinistro** se è un sottogruppo additivo e "assorbe" il prodotto da sinistra: ovvero, per ogni $r \in R$ e ogni $x \in I$, si ha che $r \cdot x \in I$. Gli ideali rappresentano per gli anelli ciò che i sottogruppi normali rappresentano per i gruppi, permettendo la costruzione degli **anelli quoziante** R/I .

1.4 Spazio Vettoriale

Definition 1.4.1: Spazio Vettoriale

Sia K un campo (i cui elementi sono detti *scalari*). Un insieme V (i cui elementi sono detti *vettori*) è un **spazio vettoriale su K** (o K -spazio vettoriale) se è dotato di due operazioni:

1. **Somma interna:** un'operazione $+ : V \times V \rightarrow V$ che rende $(V, +)$ un gruppo abeliano (commutativa, associativa, con elemento neutro 0_V e opposto per ogni vettore).
2. **Prodotto per uno scalare:** un'operazione esterna $\cdot : K \times V \rightarrow V$ tale che, per ogni scalare $\alpha, \beta \in K$ e per ogni vettore $u, v \in V$, valgano i seguenti quattro assiomi:
 - **Distributività rispetto alla somma vettoriale:** $\alpha \cdot (u + v) = (\alpha \cdot u) + (\alpha \cdot v)$
 - **Distributività rispetto alla somma scalare:** $(\alpha + \beta) \cdot v = (\alpha \cdot v) + (\beta \cdot v)$
 - **Compatibilità del prodotto:** $(\alpha\beta) \cdot v = \alpha \cdot (\beta \cdot v)$
 - **Azione dell'identità scalare:** $1_K \cdot v = v$ (dove 1_K è l'elemento neutro moltiplicativo del campo K).

L'Importanza del Campo K in Teoria delle Rappresentazioni

Nel contesto dello studio delle rappresentazioni $\rho : G \rightarrow GL(V)$, le proprietà algebriche del campo K determinano la validità dei teoremi fondamentali:

- **Chiusura Algebrica (Esistenza degli autovalori):** Se lavoriamo su $K = \mathbb{C}$ (che è un campo algebricamente chiuso), il Teorema Fondamentale dell'Algebra ci garantisce che ogni endomorfismo lineare abbia sempre almeno un autovalore. Questa proprietà è il motore logico che fa funzionare il **Lemma di Schur** e ci permette di diagonalizzare l'azione del gruppo.
- **Caratteristica del Campo (Divisione per $|G|$):** Affinché sia valido il **Teorema di Maschke** (e le rappresentazioni siano completamente riducibili), è necessario che la caratteristica del campo, $\text{char}(K)$, non divida l'ordine del gruppo finito $|G|$. Solo sotto questa condizione l'elemento $|G| \cdot 1_K$ è invertibile in K , rendendo possibile l'operazione di “media sul gruppo” per costruire i proiettori equivarianti.
- **Dimensione Relativa:** La dimensione di uno spazio vettoriale dipende strettamente da K . Ad esempio, l'insieme dei numeri complessi \mathbb{C} ha dimensione 1 se inteso come \mathbb{C} -spazio vettoriale, ma possiede dimensione 2 se lo strutturiamo come \mathbb{R} -spazio vettoriale (con base $\{1, i\}$).

1.5 Morfismi di Strutture Algebriche

In algebra astratta, un morfismo fra due strutture A, B è una funzione che trasforma l'insieme di sostegno di A nell'insieme di sostegno di B (o in una sua parte) conservando determinate caratteristiche strutturali, in base alle quali si distinguono diversi morfismi.

1.5.1 Omomorfismi

E' un'applicazione fra strutture dello stesso tipo (Gruppi, Anelli, Campi, ecc...) che conserva le operazioni in esse definite

Definition 1.5.1: Omomorfismo

Siano A e B due strutture algebriche dello stesso tipo. Una funzione $\phi : A \rightarrow B$ si dice **omomorfismo** se:

$$\forall f \text{ delle strutture}, \forall x_1, \dots, x_n. \phi(f_A(x_1, \dots, x_n)) = f_B(\phi(x_1), \dots, \phi(x_n))$$

Dove f_A, f_B rappresentano la funzione f nelle strutture A e B rispettivamente.

Se la struttura ha elementi particolari (unità', zeri, ...), questi vanno considerati come funzioni costanti con zero parametri. Ad esempio, siano e_A, e_B gli elementi neutri delle singole strutture, allora:

$$\phi(e_A) = e_B$$

Omomorfismi di gruppi

Nei gruppi, gli omomorfismi sono "compatibili" con la struttura di gruppo. Ovvero, preserva sia gli elementi neutri che inversi:

$$\phi(a^{-1}) = [\phi(a)]^{-1}$$

Inoltre, valgono le seguenti proprietà:

- **Nucleo (Kernel):** $\ker(\phi) = \{x \in G \mid \phi(x) = e_H\}$. Il nucleo misura quanto l'omomorfismo "collassa" il gruppo di partenza ed è sempre un *sottogruppo normale* di G ($\ker(\phi) \trianglelefteq G$).
- **Immagine:** $\text{Im}(\phi) = \{\phi(x) \mid x \in G\}$. L'immagine rappresenta la porzione del codominio effettivamente raggiunta ed è sempre un sottogruppo di H ($\text{Im}(\phi) \leq H$).

Nel contesto del nostro corso, una **rappresentazione lineare** di un gruppo finito G su uno spazio vettoriale V (su un campo K) non è altro che un omomorfismo di gruppi:

$$\rho : G \rightarrow GL(V)$$

dove $GL(V)$ è il gruppo degli automorfismi lineari (matrici quadrate invertibili) dello spazio V . Se $\ker(\rho) = \{e_G\}$, la rappresentazione non "perde" informazioni sul gruppo e si dice **fedele**.

1.5.2 Isomorfismi

Definition 1.5.2: Isomorfismo

Un omomorfismo $\phi : A \rightarrow B$ si dice **isomorfismo** se la funzione ϕ è biunivoca (cioè iniettiva e suriettiva).

Isomorfismi di gruppi

Se A e B sono due gruppi, allora:

- **Criterio di iniettività:** Un omomorfismo ϕ è iniettivo se e solo se $\ker(\phi) = \{e_G\}$.
- Se esiste un isomorfismo tra G e H , i due gruppi si dicono isomorfi e si scrive $G \cong H$. Strutturalmente, sono indistinguibili dal punto di vista algebrico.

1.5.3 Automorfismi

Definition 1.5.3: Automorfismo

Un **automorfismo** è un isomorfismo di una struttura in sé stessa, ovvero una mappa biunivoca $\phi : A \rightarrow A$ che preserva le operazioni.

Automorfismi di gruppi

Nel caso in cui la struttura di A è di gruppo:

- L'insieme di tutti gli automorfismi di un gruppo G , dotato dell'operazione di composizione di funzioni, forma un gruppo a sua volta, denotato con $\text{Aut}(G)$.
- **Automorfismi interni:** Fissato un elemento $g \in G$, la mappa di coniugio $\gamma_g(x) = gxg^{-1}$ è sempre un automorfismo di G . L'insieme di questi automorfismi forma un sottogruppo denotato con $\text{Inn}(G) \trianglelefteq \text{Aut}(G)$.

1.6 L'Omomorfismo Determinante

E' possibile definire la funzione del **determinante** come un omomorfismo di gruppi, vediamo come:

Definition 1.6.1: Determinante

Sia K un campo e $K^\times = K \setminus \{0\}$ il suo gruppo moltiplicativo (formato da tutti gli elementi non nulli di K con l'operazione di prodotto). L'applicazione **determinante** è una mappa:

$$\det : GL(n, K) \rightarrow K^\times$$

che associa a ogni matrice invertibile A il suo determinante $\det(A)$ (che è uno scalare in K). Poiché la matrice è invertibile, $\det(A) \neq 0$, quindi il codominio K^\times è corretto.

Questa mappa è un omomorfismo di gruppi grazie al celebre **Teorema di Binet**, il quale garantisce che il determinante del prodotto di due matrici è uguale al prodotto dei loro determinanti:

$$\det(A \cdot B) = \det(A) \cdot \det(B) \quad \forall A, B \in GL(n, K)$$

In altre parole, la mappa \det preserva (e trasporta) l'operazione di moltiplicazione dal "complicato" gruppo delle matrici al "semplice" gruppo degli scalari.

Nucleo (Kernel) e Immagine

Applicando le definizioni strutturali degli omomorfismi a questa mappa specifica, otteniamo due informazioni preziose:

- **Immagine:** La mappa è **suriettiva**. Per ogni scalare $\lambda \in K^\times$, esiste sempre almeno una matrice in $GL(n, K)$ che ha λ come determinante (basta prendere la matrice identità e sostituire il primo 1 in alto a sinistra con λ). Quindi, $\text{Im}(\det) = K^\times$.
- **Nucleo:** Il nucleo è formato da tutte le matrici mappate nell'elemento neutro del codominio (che per la moltiplicazione in K^\times è 1).

$$\ker(\det) = \{A \in GL(n, K) \mid \det(A) = 1\}$$

Questo insieme definisce il **Gruppo Speciale Lineare**, denotato con $SL(n, K)$. Poiché è il nucleo di un omomorfismo, $SL(n, K)$ è automaticamente un **sottogruppo normale** di $GL(n, K)$ ($SL(n, K) \trianglelefteq GL(n, K)$).

Conseguenza: Il Primo Teorema di Omomorfismo

Per il Primo Teorema di Omomorfismo, il quoziente del dominio rispetto al nucleo è isomorfo all'immagine. Questo ci dà una bellissima identità strutturale:

$$\frac{GL(n, K)}{SL(n, K)} \cong K^\times$$

Applicazione nel Modulo 2 (Caratteri e Rappresentazioni)

Se possediamo una rappresentazione di un gruppo G , ovvero un omomorfismo $\rho : G \rightarrow GL(n, \mathbb{C})$, possiamo comporla con l'omomorfismo determinante per creare una nuova mappa:

$$\det \circ \rho : G \rightarrow \mathbb{C}^\times$$

Poiché la composizione di due omomorfismi è ancora un omomorfismo, questa nuova mappa è a tutti gli effetti una **rappresentazione di grado 1** del gruppo G !

Chapter 2

Fondamenti della Teoria delle Rappresentazioni

Questo corso si colloca all'intersezione tra **Algebra** (gruppi, anelli, campi, spazi vettoriali) e **Combinatoria** (conteggio). Lo scopo è rendere gli oggetti algebrici *astratti* più *concreti*, studiandoli attraverso le loro azioni lineari su spazi vettoriali.

L'idea di fondo è semplice: invece di studiare un gruppo astratto G direttamente, lo "rappresentiamo" tramite matrici invertibili, che sono oggetti molto più maneggevoli.

2.1 Rappresentazioni e Sottorappresentazioni

Una **struttura algebrica astratta** — ad esempio un gruppo — è definita da un insieme e da operazioni che soddisfano degli assiomi.

Definition 2.1.1: Struttura algebrica

Si definisce struttura algebrica una coppia $(G, *)$ dove G è un insieme e $*$ è una operazione binaria su G

Example 2.1.1 (Strutture algebriche)

- **Gruppo:** $(G, *)$ con $*$ binaria e associativa, G con elemento neutro e ogni elemento ha un inverso
- **Anello:** $(G, +, \cdot)$ con $+$ e \cdot binarie e associative, G con elemento neutro per $+$ e ogni elemento ha un inverso per $+$
- **Campo:** $(G, +, \cdot)$ con $+$ e \cdot binarie e associative, G con elemento neutro per $+$ e ogni elemento ha un inverso per $+$

Per "astratta", dal latino, "tirata fuori", si intende extrapolata dal suo contesto originale. La combinatoria quindi, vuole studiare le strutture algebriche e darne una rappresentazione più concreta.

Questa struttura, infatti, può sembrare "sospesa nel vuoto", decontestualizzata. L'idea delle rappresentazioni è di portarla *dentro* uno spazio concreto, dove possiamo agire con strumenti dell'algebra lineare.

Ad esempio, un gruppo può agire su uno spazio vettoriale tramite trasformazioni lineari. Questo lo "rappresenta" come un gruppo di matrici.

Definition 2.1.2: Rappresentazione di un gruppo

Sia G un gruppo, K un campo e V uno spazio vettoriale su K . si definisce una rappresentazione di G su V è un omomorfismo

$$\rho : G \rightarrow GL(V)$$

Note:

La rappresentazione è un omomorfismo, quindi:

$$\forall g, h \in G. \rho(g)\rho(h) = \rho(gh)$$

Note:

In altre parole è un'azione (omomorfismo è un $G \rightarrow \text{GL}(V)$) di G su V con immagine $\text{GL}(V)$ tramite isomorfismi

Definition 2.1.3

Diciamo che la rappresentazione è fedele se ρ è iniettivo, ovvero se $\rho(g) = \rho(h) \implies g = h$

Note:

Ovvero il nucleo di ρ contiene solo l'elemento neutro ($\ker(\rho) = \{e\}$)

Definition 2.1.4

Sia (V, ρ) una rappresentazione di G su V , diciamo che un sottospazio vettoriale $U \subseteq V$ è una sottorappresentazione di ρ se $\rho(g)U \subseteq U$ per ogni $g \in G$

Note:

In altre parole $(U, \rho|_U)$ è una rappresentazione di G su U , dove $\rho|_U : G \rightarrow \text{GL}(U)$ è l'omomorfismo che mappa $g \rightarrow \rho(g)|_U$

Example 2.1.2 (Rappresentazione di C_4 e Dipendenza dal Campo K)

Si consideri il gruppo ciclico di ordine 4, $G = C_4 = \langle z \mid z^4 = 1 \rangle$, e la sua rappresentazione naturale su $V = \mathbb{R}^2$ definita mandando il generatore z nella matrice di rotazione di $\pi/2$:

$$\rho(z) = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

L'obiettivo è analizzare la riducibilità di ρ al variare del campo degli scalari K .

1. Analisi sul campo reale ($K = \mathbb{R}$): Per determinare se esistono sottorappresentazioni proprie, cerchiamo sottospazi stabili di dimensione 1, il che equivale a cercare gli autovalori reali di $\rho(z)$. Il polinomio caratteristico è:

$$p(\lambda) = \det(\rho(z) - \lambda I) = \det \begin{pmatrix} -\lambda & -1 \\ 1 & -\lambda \end{pmatrix} = \lambda^2 + 1$$

Le radici di $p(\lambda)$ sono $\pm i$, le quali **non appartengono** a \mathbb{R} . Non esistendo autovalori reali, non esistono rette in \mathbb{R}^2 stabili sotto l'azione della rotazione.

*Conclusione: ρ è **irriducibile** su \mathbb{R} .*

2. Analisi sul campo complesso ($K = \mathbb{C}$): Se estendiamo lo spazio vettoriale a $V_{\mathbb{C}} = \mathbb{C}^2$, gli autovalori $\lambda_1 = i$ e $\lambda_2 = -i$ sono ora ammissibili. Ad essi corrispondono i rispettivi autospazi (sottospazi di dimensione 1):

$$V_i = \text{span}_{\mathbb{C}} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \right\}, \quad V_{-i} = \text{span}_{\mathbb{C}} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \right\}$$

Questi sottospazi sono G -invarianti, poiché l'azione di z (e delle sue potenze) si limita a moltiplicare i vettori per uno scalare ($\pm i$). Lo spazio si decompone nella somma diretta:

$$V_{\mathbb{C}} = V_i \oplus V_{-i}$$

*Conclusione: ρ è **riducibile** su \mathbb{C} .*

Definition 2.1.5: Rappresentazione Irriducibile

Una rappresentazione (ρ, V) di un gruppo G si dice **irriducibile** se gli unici sottospazi di V che siano G -invarianti (sottorappresentazioni) sono i sottospazi banali $\{0\}$ e V stesso. In caso contrario, ovvero se esiste un sottospazio proprio $0 < U < V$ tale che $\rho(g)u \in U$ per ogni $u \in U$ e $g \in G$, la rappresentazione si dice **riducibile**.

Note:

Osservazioni sulla Riducibilità:

- Una rappresentazione di dimensione 1 è sempre irriducibile per motivi dimensionali (non esistono sottospazi propri non nulli).
- Il concetto di irriducibilità dipende dal campo K (come visto nell'esempio delle rotazioni su \mathbb{R} vs \mathbb{C}).
- Scomporre una rappresentazione riducibile in somma diretta di irriducibili è l'obiettivo principale del corso (completabilità garantita dal Teorema di Maschke).

Example 2.1.3 (Rappresentazione Naturale di S_3)

Sia $G = S_3$ agente su $V = \mathbb{R}^3$ tramite permutazione delle coordinate:

$$\sigma \cdot (x_1, x_2, x_3) = (x_{\sigma^{-1}(1)}, x_{\sigma^{-1}(2)}, x_{\sigma^{-1}(3)})$$

Questa rappresentazione è **riducibile** in quanto ammette i seguenti sottospazi G -invarianti propri:

1. $U = \{(t, t, t) \mid t \in \mathbb{R}\}$, sottospazio di dimensione 1 (retta diagonale). Poiché ogni permutazione scambia coordinate identiche, U è puntualmente fisso.
2. $W = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 \mid x_1 + x_2 + x_3 = 0\}$, sottospazio di dimensione 2 (piano iperortogonale a U). Poiché la somma è commutativa, permutare gli addendi non cambia il risultato zero.

Si verifica facilmente che $U \cap W = \{0\}$, pertanto lo spazio si decompone nella somma diretta:

$$V = U \oplus W$$

Dove U è la rappresentazione banale e W è la **rappresentazione standard** di S_3 . Entrambe sono irriducibili.

Definition 2.1.6: Prodotto Hermitiano G -invariante

Sia (ρ, V) una rappresentazione di un gruppo finito G su uno spazio vettoriale complesso V . Dato un prodotto hermitiano arbitrario $\langle \cdot, \cdot \rangle$ su V , definiamo il **prodotto hermitiano G -mediato** (o G -invariante) come:

$$\langle v, u \rangle_G := \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \langle \rho(g)v, \rho(g)u \rangle$$

per ogni $v, u \in V$. Tale prodotto soddisfa la condizione di invarianza:

$$\langle \rho(h)v, \rho(h)u \rangle_G = \langle v, u \rangle_G \quad \forall h \in G$$

Proposition 2.1.1 Esistenza di un Prodotto Hermitiano G -invariante

Sia (ρ, V) una rappresentazione di un gruppo finito G su uno spazio vettoriale complesso V . Esiste sempre su V un prodotto hermitiano $\langle \cdot, \cdot \rangle_G$ che sia G -invariante, ovvero tale che:

$$\langle \rho(g)v, \rho(g)u \rangle_G = \langle v, u \rangle_G \quad \forall g \in G, \forall v, u \in V$$

Dimostrazione: Sia $H(v, u)$ un prodotto hermitiano arbitrario su V (la cui esistenza è garantita dalla struttura

di spazio vettoriale complesso). Definiamo il nuovo prodotto facendo la media sui trasformati degli elementi tramite il gruppo:

$$\langle v, u \rangle_G := \frac{1}{|G|} \sum_{x \in G} H(\rho(x)v, \rho(x)u)$$

Per verificare l'invarianza, applichiamo un elemento generico $h \in G$:

$$\langle \rho(h)v, \rho(h)u \rangle_G = \frac{1}{|G|} \sum_{x \in G} H(\rho(x)\rho(h)v, \rho(x)\rho(h)u)$$

Poiché ρ è un omomorfismo, $\rho(x)\rho(h) = \rho(xh)$. Sostituendo:

$$\langle \rho(h)v, \rho(h)u \rangle_G = \frac{1}{|G|} \sum_{x \in G} H(\rho(xh)v, \rho(xh)u)$$

Al variare di x in G , l'elemento xh percorre tutti gli elementi del gruppo esattamente una volta (la traslazione a destra è una permutazione di G). Possiamo quindi effettuare il cambio di variabile $k = xh$, ottenendo:

$$\langle \rho(h)v, \rho(h)u \rangle_G = \frac{1}{|G|} \sum_{k \in G} H(\rho(k)v, \rho(k)u) = \langle v, u \rangle_G$$

Questo dimostra che il prodotto è G -invariante. Le proprietà di linearità, simmetria hermitiana e positività di $\langle \cdot, \cdot \rangle_G$ discendono direttamente dalle proprietà di H . \square

Definition 2.1.7: Rappresentazione Indecomponibile

Una rappresentazione (ρ, V) si dice **indecomponibile** se non può essere scritta come somma diretta di due sottorappresentazioni proprie non banali. Ovvero, se $V = U \oplus W$ con U, W sottorappresentazioni, allora necessariamente $U = 0$ oppure $W = 0$.

Note:

Irriducibile vs Indecomponibile:

- Ogni rappresentazione **irriducibile** è banalmente **indecomponibile** (se non ha sottospazi stabili, a maggior ragione non può essere somma diretta di sottospazi stabili).
- Il viceversa non è sempre vero: esistono rappresentazioni che possiedono sottospazi stabili (sono riducibili) ma che non ammettono un complemento stabile (sono indecomponibili).
- **Nel Modulo 2:** Grazie al Teorema di Maschke, lavorando su un campo di caratteristica 0 (come \mathbb{C}) e con gruppi finiti, ogni sottorappresentazione ammette un complemento stabile. Di conseguenza, in questo contesto i concetti di irriducibile e indecomponibile **coincidono**.

Proposition 2.1.2 Teorema di Maschke (Versione Sintetica)

Sia G un gruppo finito e (ρ, V) una rappresentazione di G su un campo K (con $\text{char}(K) \nmid |G|$). Allora ogni sottorappresentazione $U \subseteq V$ ammette un complemento G -invariante W , tale che $V = U \oplus W$.

Dimostrazione: L'esistenza di W è garantita dalla costruzione di un proiettore G -equivariante ottenuto tramite il **trucco della media**. Sia $\pi : V \rightarrow U$ una proiezione lineare arbitraria. Definiamo:

$$\tilde{\pi} = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \rho(g)\pi\rho(g)^{-1}$$

Si dimostra che $\tilde{\pi}$ è un morfismo di rappresentazioni e che $\ker(\tilde{\pi})$ è il complemento stabile W cercato. \square

Example 2.1.4

$V = C^2 (Z, +)$

$$\rho(n) = \begin{pmatrix} 1 & n \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

è un omomorfismo perché

$$\rho(n)\rho(m) = \begin{pmatrix} 1 & n \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & m \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & n+m \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \rho(n+m)$$

Note:

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

Lemma 2.1.1

Sia G un gruppo finito. E sia V una sottorappresentazione (su C) allora ogni sottorappresentazione $U \subseteq V$ ammette un complementare $W \subseteq V$ tale che $V = U \oplus W$ e W è una sottorappresentazione. Quindi indecomponibile \implies irriducibile

Dimostrazione: Data una sottorappresentazione $U \subseteq V$ consideriamo $U^\perp = \{v \in V | \langle v, u \rangle = 0 \forall u \in U\}$, dove $\langle \cdot, \cdot \rangle$ è un prodotto scalare hermitiano su V (quello G invariante), chiaramente $V = U \oplus U^\perp$ e U^\perp è una sottorappresentazione perché $\forall v \in U^\perp, \forall g \in G, \forall u \in U$ abbiamo $\langle \rho(g)v, u \rangle = \langle v, \rho(g^{-1})u \rangle = 0$ perché $u \in U$ e $\rho(g^{-1})u \in U$. \square

Definition 2.1.8

A anello con 1_A , $(V, +)$ gruppo abeliano, è un A -modulo sinistro se $A \times V \rightarrow V$ tale che :

- $(a + b)v = av + bv$
- $a(v + w) = av + aw$
- $a(bv) = (ab)v$
- $1_A v = v$

Definition 2.1.9: $K[G]$

Combinazioni lineari formali di elementi di G con coefficienti in $K = \{\sum_{g \in G} a_g e_g | a_g \in K, \text{supp}(a_g) < \infty\}$ con prodotto a_g, e_g