Categorie per il matematico disoccupato

Filippo L. Troncana, per il corso "Strumenti Informatici per la Matematica"

A.A. 2023/2024

1 Introduzione e prime definizioni

Durante la seconda metà del XX secolo la profondissima (sebbene apparentemente banale) osservazione del fatto che in fondo tutta la matematica è fatta di *cosi*[1] e frecce tra *cosi* ha motivato l'introduzione del concetto di Categoria.

Informalmente parlando una categoria è fatta da oggetti che condividono un certo senso di struttura e delle frecce che li collegano, che preservano questo tipo di struttura. Un esempio classico è la categoria **Set**, ovvero gli insiemi e le funzioni tra essi, oppure la categoria **Top** degli spazi topologici le cui frecce sono le funzioni continue. Procediamo a dare una definizione un po' più rigorosa.

Definizione 1.1. *Una* **categoria** $\mathcal{C}$ *consiste nelle seguenti:*

- *Una classe* $\mathrm{ob}(\mathcal{C})$ *i cui elementi sono detti* oggetti *di* $\mathcal{C}$[2].
- *Una classe* $\mathrm{mor}(\mathcal{C})$ *i cui elementi sono detti* morfismi *di* $\mathcal{C}$*. Ogni morfismo* f *ha un unico oggetto sorgente* A *e un unico oggetto di destinazione* B*, e si denota con* $f : A \to B$*. La classe dei morfismi tra due oggetti nella stessa categoria si indica con* $\mathrm{mor}(A, B)$*.*
- *Per ogni terna di oggetti* $A, B, C \in \mathrm{ob}(\mathcal{C})$*, è definita una* legge di composizione *tra morfismi, che a un morfismo* $f : A \to B$ *e* $g : B \to C$ *associa un unico morfismo* $g \circ f : A \to C$*. La composizione di morfismi deve rispettare le seguenti proprietà:*
  - *L'*associatività*: per qualsiasi terna di morfismi* $f : A \to B$*,* $g : B \to C$ *e* $h : C \to D$ *vale* $h\circ(g\circ f) = (h\circ g)\circ f$*.*
  - *L'esistenza del morfismo* identità*: per ogni oggetto* $X \in \mathrm{ob}(\mathcal{C})$ *esiste un morfismo* $\mathrm{id}_X : X \to X$ *tale che per ogni morfismo* $f : A \to X$ *e* $g : X \to A$ *valgano* $\mathrm{id}_X \circ f = f$ *e* $g \circ \mathrm{id}_X = g$*.*

Osservazione 1.1. *Dato che per ogni oggetto esiste un unico (la dimostrazione dell'unicità è banale) morfismo identità, una categoria risulta essere univocamente determinata dai suoi morfismi, e pertanto è possibile definire le categorie semplicemente in base alla classe dei morfismi.*

Arricchiamo leggermente il nostro linguaggio

Definizione 1.2. *Sia* $\mathcal{C}$ *una categoria.*
Se $\mathrm{mor}(\mathcal{C})$ *è un insieme (e dunque per l'osservazione precedente lo è anche* $\mathrm{ob}(\mathcal{C})$*), allora* C *si dice* piccola*, altrimenti si dice* grande.
Una categoria in cui una volta fissati due $A, B \in \mathrm{ob}(\mathcal{C})$ *allora* $\mathrm{mor}(A, B)$ *è un insieme si dice* localmente piccola.

Definizione 1.3. *Sia* $\mathcal{C}$ *una categoria e sia* $f : A \to B$ *un morfismo. Esso si dice:*

- Endomorfismo *se* $A = B$
- Isomorfismo *se* $\exists f' : B \to A$ *tale che* $f \circ f' = \mathrm{id}_B \wedge f' \circ f = \mathrm{id}_A$
- Automorfismo *se è contemporaneamente endomorfismo e isomorfismo.*

Al lettore dotato di un qualsivoglia $\varepsilon > 0$ piccolo a piacere di familiarità con l'algebra astratta, la definizione di categoria risulterà analoga a quella di monoide. In effetti un monoide $(M, +)$ non è altro che una categoria piccola con un unico oggetto (l'insieme M) e i cui morfismi corrispondono alle traslazioni degli elementi di M sugli altri elementi di M.
Inoltre, quasi sempre, quando si esprime l'unicità di qualcosa in teoria delle categorie la si considera a meno di isomorfismo, come vedremo più avanti.

[1] termine tecnico
[2] Occasionalmente, scriveremo $A \in \mathcal{C}$ invece di $A \in \mathrm{ob}(\mathcal{C})$ con un lieve abuso di notazione

2 Diagrammi commutativi

Ai *cat-boys*[3] piace molto esprimere qualsiasi proprietà attraverso cosiddetti diagrammi commutativi, utili strumenti per esprimere le relazioni fra oggetti e morfismi in una categoria

Definizione 2.1. *Un* diagramma commutativo *è un grafo diretto in cui i nodi sono costituiti da oggetti e i cui archi sono costituiti da morfismi tra essi in modo tale che percorrere un arco corrisponda ad applicare il morfismo a esso associato.*

Ad esempio, i diagrammi commutativi possono essere usati per riformulare in modo visualmente intuitivo alcuni teoremi.

Teorema 2.1. *Sia* $\mathbb{K} \in \boldsymbol{\mathsf{Fld}}$*, siano* $V, W \in \boldsymbol{\mathsf{Vec}}(\mathbb{K})$ *e sia* $f \in \operatorname{mor}(V, W)$*.*
Allora $\exists! \phi \in \operatorname{mor} V/\ker(f), \operatorname{Im}(f)$ *tale che* ϕ *sia un isomorfismo e si abbia* $f = i \circ \phi \circ \pi$*.*
Equivalentemente, $\exists! \phi \in \operatorname{mor} V/\ker(f), \operatorname{Im}(f)$ *tale che il seguente diagramma commuti:*

$$\begin{tikzcd}
V \arrow[r, "f"] \arrow[d, "\pi"] & W \\
V/\ker(f) \arrow[r, shift left, "\phi"] & \operatorname{im}(f) \arrow[u, hook, "i"] \arrow[l, shift left, "\phi^{-1}"]
\end{tikzcd}$$

La stessa definizione di categoria può essere ridata attraverso i diagrammi commutativi.

Definizione 2.2. *Una* Categoria $\mathcal{C}$ *è formata da:*

- *Una classe di oggetti denotata* $\operatorname{ob}(\mathcal{C})$*.*
- *Una classe di morfismi denotata* $\operatorname{mor}(\mathcal{C})$ *in cui ogni morfismo* f *ha un oggetto* A *di partenza (detto dominio) e* B *di arrivo (detto codominio) e si denota con* $f : A \to B$*.*
- *Una legge di composizione* $(g, f) \mapsto gf$ *tale che i seguenti diagrammi commutino.*

$$\begin{tikzcd}
X \arrow[loop above, "\mathrm{id}_X"]
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
X \arrow[r, "f"] \arrow[dr, "gf"'] & Y \arrow[d, "g"] \\
& Z
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
W \arrow[rr, "fh"] \arrow[dr, "h"'] & & Y \arrow[dr, "g"] & \\
& X \arrow[ur, "f"] \arrow[rr, "gf"'] & & Z
\end{tikzcd}$$

3 Funtori e trasformazioni naturali

3.1 Funtori

Abbiamo parlato di oggetti e frecce tra oggetti. Ma se volessimo parlare di frecce tra le frecce?

Definizione 3.1. *Siano* $\mathcal{C}, \mathcal{D}$ *due categorie.*
Un Funtore covariante *è una mappa* $F : \mathcal{C} \to \mathcal{D}$ *tale che:*

- $\forall X \in \operatorname{ob}(\mathcal{C}), \exists! F(X) \in \operatorname{ob}(\mathcal{D})$
- $\forall f : A \to B \in \operatorname{mor}(\mathcal{C}), \exists! F(f) : F(A) \to F(B) \in \operatorname{mor}(\mathcal{D})$

Un Funtore controvariante *è una mappa* G *da* C *a* D *tale che:*

- $\forall X \in \operatorname{ob}(\mathcal{C}), \exists! G(X) \in \operatorname{ob}(\mathcal{D})$
- $\forall f : A \to B \in \operatorname{mor}(\mathcal{C}), \exists! G(f) : G(B) \to G(A) \in \operatorname{mor}(\mathcal{D})$

Un Funtore (covariante o controvariante) $F : \mathcal{C} \to \mathcal{D}$ *deve rispettare le seguenti proprietà:*

- $\forall X \in \operatorname{ob}(\mathcal{C}), F(\mathrm{id}_X = \mathrm{id}_{F(X)})$
- $\forall f, g \in \operatorname{mor}(\mathcal{C}), F(g \circ f) = F(g) \circ F(f)$

[3]Teorici delle categorie

La situazione che stiamo immaginando si traduce dunque in questo diagramma commutativo (dove F e G sono come nella definizione)

$$\begin{tikzcd}
F(X) \arrow[rrrrr, "F(f)"] \arrow[ddddd, "\mathrm{id}_{F(X)}"'] & & & & & F(Y) \arrow[ddddd, "F(g)"] \\
& X \arrow[rrr, "f"] \arrow[ddd, "\mathrm{id}_X"'] & & & Y \arrow[ddd, "g"] & \\
& & G(X) & G(Y) \arrow[l, "G(f)"'] & & \\
& & G(X) \arrow[u, "\mathrm{id}_{G(X)}"'] & G(Z) \arrow[l, "G(g\circ f)"] \arrow[u, "G(g)"] & & \\
& X \arrow[rrr, "g\circ f"] & & & Z & \\
F(X) \arrow[rrrrr, "F(g\circ f)"'] & & & & & F(Z)
\end{tikzcd}$$

Vediamo degli esempi che ci permettano di chiarire:

- La mappa S : **Grp** $\to$ **Set** che ad un gruppo $(G,+)$ associa l'insieme G è un funtore covariante, detto funtore dimenticante[4]. Esistono numerosi (infiniti, in effetti) funtori smemorati, ad esempio da **Fld** a **Vec**($\mathbb{K}$), da **Vec**($\mathbb{K}$) a **Grp**, da **Top** a **Set** e così via, da qualsiasi categoria i cui oggetti siano quelli della categoria in arrivo con una struttura più regolare.

- La mappa π_1 : **Top*** $\to$ **Grp** che a uno spazio topologico con un punto fissato associa il suo gruppo fondamentale è un funtore covariante, in particolare è il primo (definito come tale) incontrato dalla maggior parte degli studenti.

- La mappa $*$: **Vec**($\mathbb{K}$) $\to$ **Vec**($\mathbb{K}$) che ad uno spazio vettoriale V associa il suo spazio duale V^*, ovvero lo spazio vettoriale dei morfismi $V \to \mathbb{K}$ (dove $\mathbb{K}$ è visto come oggetto in **Vec**($\mathbb{K}$)), è un funtore controvariante.

- La mappa **Set** $\to$ **Graph*** (dove **Graph*** è la categoria dei grafi diretti) che ad una famiglia di oggetti e morfismi rappresentati da un insieme di indici associa un diagramma commutativo è un funtore[5].

- In una categoria localmente piccola $\mathcal{C}$, fissato un oggetto X, la mappa $\mathrm{mor}(X,-) : \mathcal{C} \to$ **Set** manda un oggetto Y nell'insieme $\mathrm{mor}\, X, Y$ (o viceversa) è un funtore particolarmente importante, detto *morfuntore*[6].

È interessante notare che in una data categoria la classe dei morfismi tra due oggetti può possedere una struttura notevole: per esempio fissato un $V \in \mathrm{ob}($**Vec**$(\mathbb{K}))$, l'insieme $\mathrm{mor}(V,V)$ è un'algebra associativa su $\mathbb{K}$, al cui studio è dedicato tutto il primo semestre del corso di Geometria A. Ma se volessimo fissare due categorie e parlare dei funtori tra di esse, come potremmo procedere?

3.2 Trasformazioni naturali

Definizione 3.2. *Siano $F, G : \mathcal{A} \to \mathcal{B}$ due funtori dalla categoria $\mathcal{A}$ alla categoria $\mathcal{B}$*
Si dice trasformazione naturale *una collezione $\{\alpha_X : F(X) \to G(X)\}$ di morfismi in $\mathcal{B}$ indicizzati da oggetti di $\mathcal{A}$ tale che il seguente diagramma commuti:*

$$\begin{tikzcd}
X \arrow[d, "f"] & F(X) \arrow[r, "\alpha_X"] \arrow[d, "F(f)"] & G(X) \arrow[d, "G(f)"] \\
Y & F(Y) \arrow[r, "\alpha_X"] & G(Y)
\end{tikzcd}$$

Ovvero, tale che per ogni oggetto X e ogni morfismo $f : X \to Y$ di $\mathcal{A}$ si abbia $\alpha_X \circ F(f) = G(f) \circ \alpha_X$.

[4]nonostante "dimenticante" sia il termine utilizzato in letteratura, l'autore preferisce "smemorato"
[5]Sì, sostanzialmente qualsiasi cosa è un funtore
[6]Traduzione casalinga dell'espressione inglese *hom-functor*

Possiamo dunque immaginare una trasformazione naturale come una specie di funtore tra funtori dunque, in un diagramma commutativo di questo tipo:

$$\begin{tikzcd}
 & & X \arrow[r, "f"] & Y \arrow[dr, Rightarrow, no head] & & & \\
 & F \arrow[dl, Rightarrow] \arrow[ur, Rightarrow, no head] \arrow[rrr, Rightarrow, "\alpha"] & & & \alpha(F) \arrow[dr, Rightarrow] & & \\
F(X) \arrow[r, "F(f)"] & F(Y) & & & & {[\alpha(F)](X)} \arrow[r, "{[\alpha(F)](f)}"] & {[\alpha(F)](Y)}
\end{tikzcd}$$

L'idea di trasformazione naturale ci serve a definire un altro concetto fondamentale, l'aggiunzione tra categorie.

Definizione 3.3. *Siano $\mathcal{C}$ e $\mathcal{D}$ due categorie.*
Si dice aggiunzione *tra $\mathcal{C}$ e $\mathcal{D}$ una coppia di funtori $L : \mathcal{C} \to \mathcal{D}$ e $R : \mathcal{D} \to \mathcal{C}$ tale che ci sia un isomorfismo $\mathrm{mor}_{\mathcal{D}}(L(X), Y) \cong \mathrm{mor}_{\mathcal{C}}(X, R(Y))$ per qualsiasi coppia di oggetti X e Y in $\mathcal{C}$ e $\mathcal{D}$ tale che le mappe.*

4 Proprietà universali

Uno dei principali punti di forza della teoria delle categorie è il permettere di formulare delle cosiddette "proprietà universali" di una costruzione. Partiamo con un esempio

Teorema 4.1. *$\mathbb{R}$ è l'unico campo completo totalmente ordinato, a meno di isomorfismo. [5]*

Le possibili costruzioni dei numeri reali sono molte, le più famose sono quelle per classi di equivalenza di successioni di Cauchy o per sezioni di Dedekind a partire da $\mathbb{Q}$, ma come facciamo a dimostrare che una nuova bizzarra costruzione che ci è appena venuta in mente sia effettivamente una costruzione dei numeri reali? È semplice, basta dimostrare che con le opportune operazioni, che idealmente dovrebbero emergere in modo naturale dalla nostra costruzione, questo oggetto costituisca un campo totalmente ordinato e completo, e dal teorema precedente avremo la garanzia che sia $\mathbb{R}$ (o almeno, che sia isomorfo a esso). Dunque c'è un senso in cui questa è una proprietà che è "universale" rispetto alle costruzioni dei numeri reali.
Esaminiamo un altro caso.

Definizione 4.1. *Siano X, Y oggetti in una categoria $\mathcal{C}$. Si dice* prodotto *di X e Y un oggetto $X\mathbf{\Pi}Y$ di $\mathcal{C}$ fornito di una coppia di morfismi $\pi_X : X\mathbf{\Pi}Y \to X$ e $\pi_Y : X\mathbf{\Pi}Y \to Y$ suriettivi tale che per qualsiasi morfismo $f : Z \to X\mathbf{\Pi}Y$ esistano unici $f_X : Z \to X$ e $f_Y : Z \to Y$ tali per cui il seguente diagramma commuti:*

$$\begin{tikzcd}
 & Z \arrow[dl, "f_X"'] \arrow[d, "f"] \arrow[dr, "f_Y"] & \\
A & X\mathbf{\Pi}Y \arrow[l, "\pi_X"] \arrow[r, "\pi_Y"'] & Y
\end{tikzcd}$$

In questo modo, generalizziamo le idee di prodotto cartesiano in **Set**, prodotto topologico in **Top** o prodotto tensoriale in **Vec**($\mathbb{K}$): qualsiasi tipo di "prodotto" tra due strutture dello stesso tipo è completamente caratterizzato dalle proiezioni alle sue componenti.

5 Conclusione

In conclusione, il formalismo della teoria delle categorie fornisce una sorta di "grande teoria unificata" delle varie branche della matematica

6 Off topic

Durante il mio *spulciare* l'amplissima libreria di texlive, mi sono imbattuto nel pacchetto `rpgicons` che è semplicemente stupendo, permette di fare cose come 20

Riferimenti bibliografici

[1] T.-D. B. et al, *Topology: a Categorical Approach.* The MIT Press, 2020, ISBN: 9780262539357.

[2] M. Andreatta, *La forma delle cose. L'alfabeto della geometria* (Intersezioni. Raccontare la matematica). Il Mulino, 2019, ISBN: 9788815280091. indirizzo: `https://books.google.it/books?id=t734vgEACAAJ`.

[3] S. Awodey, *Category Theory*, 2nd. USA: Oxford University Press, Inc., 2010, ISBN: 0199237182.

[4] S. MacLane, *Categories for the Working Mathematician (2nd ed)* (Graduate Texts in Mathematics). Springer, 1978, ISBN: 0-387-98403-8.

[5] E. V. Huntington, «Complete Sets of Postulates for the Theory of Real Quantities,» *Transactions of the American Mathematical Society*, vol. 4, n. 3, pp. 358–370, 1903, ISSN: 00029947. indirizzo: http://www.jstor.org/stable/1986269.