Lezione 1 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-02-27

1 Informazioni pratiche

Giovedì esercitazioni
Ci sono gli esercizi settimanali! Alcuni di questi sono da sapere per l'orale
Se vogliamo essere avvertiti per urgenze possiamo mandare una mail
C'è il sito del corso
Per la maggior parte del corso di studia su Topologia di Marco Manetti
Esami:
Ci sono 2 esoneri
L'esame è scritto e orale
Prerequisiti
1) Familiarità con le funzioni continue
2) Un po' di teoria dei gruppi
3) Derivate di applicazioni in più variabili

Il corso è diviso in 3 parti:
1)Topologia generale
2) Topologia algebrica
3) Geometria differenziale

2 Topologia Generale

2.1 Introduzione

Nasce per studiare sottoinsiemi di $\mathbb{R}^n$, cosa posso fare con un sottoinsieme di R^n con un applicazione continua?
Studieremo:
1) Proprietà dei sottoinsiemi di $\mathbb{R}^n$, come ad esempio la compattezza, da un punto di vista astratto.
2) Applicheremo le stesse proprietà ad insiemi dotati di "geometria" meno intuitiva
Ad esempio la topologia generale si applica in

- Analisi
- Algebra
- Logica

Esempio
In $\mathbb{R}^2$ prendiamo

$$X = \mathbb{R} \times \{0, 1\}.$$

Poniamo, in maniera informale, questa relazione d'equivalenza:

$$(x, 0) \sim (x, 1) \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

Il quoziente "assomiglia" ad una sola retta, gli elementi equivalenti vengono "appiccicati".
Seconda relazione d'equivalenza:

$$(x,0) \sim (x,1) \text{ solo per } x \leq 0.$$

$X/\sim$ in questo caso assomiglia a :
Terza relazione d'equivalenza:

$$(x,0) \sim (x,1) \text{ solo per } x < 0.$$

Una specie di analogo della figura precedente, ma il punto $[0,0]$ è raddoppiato

Definizione 1 (Funzioni continue)
Dati $X \subseteq \mathbb{R}^n$ e $Y \subseteq \mathbb{R}^m$ insiemi qualsiasi, si definisce continua un'applicazione $f : X \to Y$ se

$$\forall p \in X \quad \forall \epsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \quad se \quad x \in X \quad soddisfa.$$

$$||x-p|| < \delta \quad allora \quad ||f(x) - f(p)|| < \epsilon.$$

Definizione 2 (Omeomofrismo)
Data $f : X \to Y$ si dice omeomorfismo se è biettiva, continua, e $f^{-1} : Y \to X$ è continua.

Osservazione
In topologia generale gli omeomorfismo hanno un ruolo analogo agli isomorfismi in algebra e algebra lineare.
Esempio:
1) $[0,1]$ (in $\mathbb{R}$) è omeomorfo ad $[a,b]$ $\forall a,b \in \mathbb{R}$ con $a < b$
ad esempio

$$f : [0,1] \to [a,b]$$
$$t \to (1-t)a + tb$$

è biettiva, continua e f^{-1} è continua.
2) $S^1 = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 | x^2 + y^2 = 1\}$ e $Q = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 | max\{|x|, |y|\} = 1\}$
Per esempio possiamo normalizzare i punti del quadrato

$$\text{Q} \to S^1$$
$$\text{p} \to \frac{p}{||p||}$$

che è continua, biettiva e ha inversa continua.
3)$[0,1] \cup]2,3]$ non è omeomorfo a $[0,2]$
ad esempio

$f : [0,1] \cup]2,3] \to [0,2]$

$$x \to \begin{cases} x & \text{se } x \leq 1 \\ x-1 & \text{se } x > 1 \end{cases}$$

Con l'analisi matematica si dimostra facilmente che non esiste alcuna biezione con inversa continua.

Osservazione

In algebra se f è un omomorfismo biettivo allora f^{-1} è un omomorfismo.
In topologia se f è continua e biettiva, f^{-1} non è sempre continua.

4) $]0,1[$ è omeomorfo a $]a,b[$ $\forall a,b \in \mathbb{R}$ $a < b$
Inoltre $]0,1[$ è omeomorfo a $]0,+\infty[$
ad esempio tramite
$]0,+\infty[\to]0,1[$

$x \to e^{-x}$

5)$]0,+\infty[$ è omeomorfo a $\mathbb{R}$, ad esempio tramite $x \to log(x)$
6) $]0,1[$ non è omeomorfo a $[0,1]$
7) $S^n = \{p \in \mathbb{R}^{n+1} | \ \ ||p|| = 1\}$
$S^n \setminus \{(0,\ldots,0,1)\}$ è omeomorfo a $\mathbb{R}^n$ Ad esempio tramite la proiezione stereografica (esercizio: vedere la formula)
8) Ci sono molti esempi di figure omeomorfe fra loro, ma un omeomorfismo esplicito è difficile, ad esempio.
un l-agono regolare qualsiasi (in $\mathbb{R}^n$) e un r-agono qualsiasi sono omeomorfi ($\forall\ l,r \geq 3$)
9) $\mathbb{R}^n$ e $\mathbb{R}^m$ sono omeomorfi se e solo se $n = m$ (è un teorema difficile, nel corso vedremo la dimostrazione per qualche esponente specifico, $n \leq 2$)
Vediamo due riformulazioni della continuità.

Definizione 3
$A \subseteq \mathbb{R}^n$ si dice aperto se

$$\forall p \in A \ \ \varepsilon > 0 \ \ | \ \ se \ \ x \in \mathbb{R}^n.$$

$$soddisfa \ \ ||x-p|| < \ \ \ allora\ x \in A.$$

Notazione 1
$B_\varepsilon(p) = \{x \in \mathbb{R}^n | \ ||x-p|| < \epsilon\}$
è la palla aperta di centro p e raggio

Definizione 4
Sia $X \subseteq \mathbb{R}^n$ e $p \in \mathbb{R}^n$ p si dice aderente a X se $\forall > 0$ $\exists x \in X$ | $||x-p|| < \epsilon$ (chiaramente se pX allora è aderente a X, basta prendere $x = p$)

Esempio:
$1 \in \mathbb{R}$ è aderente a $X = [0,1[$

Proposizione 1
Sia $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$ *Sono equivalenti:*

1. f *è continua*
2. $\forall Z \subseteq \mathbb{R}^n \quad \forall p \in \mathbb{R}^n$ *se* p *è aderente a* Z
   allora $f(p)$ *è aderente a* $f(Z)$
3. $\forall A \subseteq \mathbb{R}^m$ *se* A *è aperto, allora* $f^{-1}(A)$ *è aperto.*

Dimostrazione
1) $\Rightarrow$ 2)
Siano $Z \subseteq \mathbb{R}^n, p \in \mathbb{R}^n$ *suppongo* p *aderente a* Z*, dimostriamo che* $f(p)$ *è aderente a* $f(Z)$
Sia $\epsilon > 0$ *qualsiasi, sia* $\delta > 0$*, dalla continuità di* f *in* p*. Dato che* p *è aderente a* Z *esiste* $z \in Z$ *tale che* $||z - p|| < \delta$*.*
Allora $f(z)$ *è un punto di* $f(Z)$ *e* $||f(p) - f(z)|| < \varepsilon$*.*
2) $\Rightarrow$ 3)
Sia $A \subseteq \mathbb{R}^m$ *aperto, dimostriamo che* $f^{-1}(A)$ *è aperto, dimostriamo che* $f^{-1}(A)$ *è aperto in* $\mathbb{R}^m$
Sia $p \in f^{-1}(A)$ *sia* $f(p) \in A$
Per assurdo supponiamo.
$\forall > 0 \exists q \in \mathbb{R}^n$ *fuori da* $f^{-1}(A)$ *ma* $||p - q|| < \varepsilon$*.*
Allora p *è aderente a* $\mathbb{R}^m \setminus f^{-1}(A)$*.*
Segue, per 2), $f(p)$ *è aderente a* $f(\mathbb{R}^n \setminus f^{-1}(A))$
quindi per ogni $\eta > 0$ *esistono punti a distanza* $< \eta$ *non in* $f(\mathbb{R}^n \setminus f^{-1}(A))$ *punti che non vanno in* A
allora $f(p)$ *è aderente a* $\mathbb{R}^m \setminus A$*. Questo è assurdo perché* A *è aperto* $\square$

Lezione 02 Geometria II

Federico De Sisti

2025-03-08

1 Spazi Topologici

Definizione 1 (Topologia)
Sia X un insieme, $T \subset P(X)$
T è detta Topologia se:

1. *$X, \emptyset \in T$*
2. *Unione di una famiglia qualsiasi di elementi in T è un elemento di T*
3. *intersezione di 2 elementi qualsiasi di T è un elemento di T.*

In tal caso gli elementi di T sono detti aperti di T.
*La coppia (X, T) è detta **spazio topologico** (o anche semplicemente insieme X)*

Osservazione

- Famiglia qualsiasi vuol dire infinita numerabile, o finita, o non numerabile, o anche vuota
- L'intersezione di una famiglia finita di elementi di T è ancora un elemento di T
- Possiamo interscambiare la precedente affermazione e la proprietà 3 della definizione

Nota

- "intervallo aperto" $=]a, b[\subseteq \mathbb{R}$ come al solito
- aperto = elemento della topologia T

Esempi 1) Ogni insieme è dotato almeno delle seguenti topologia

1. $T = \{X, \emptyset\}$, detta **topologia banale**
2. $T = P(x)$, detta **topologia discreta**

Osserviamo che, nella topologia discreta, $\{x\}$ è aperto $\forall x \in X$
2) $X = \mathbb{R}^n$
$T = \{A \subseteq X \mid \forall a \in A \ \exists \varepsilon > 0 \ t.c. \ B_\varepsilon(a) \subseteq A\}$ è la topologia euclidea
La dimostrazione del fatto che sia una topologia è un esercizio per casa
3) Sia X insieme, $p \in X$. Definiamo $T = \{A \subseteq X \mid p \in A$, oppure $A = \emptyset\}$ T è una topologia
4) X insieme, poniamo $T = \{A \subseteq X \mid X \setminus A$ è finito, oppure $A = \emptyset\}$
T è una topologia, detta **topologia cofinita**

Definizione 2
Sia (X, T) spazio topologico, $C \subseteq X$ è chiuso se $X \setminus C$ è aperto

Lemma 1 (Proprietà degli insiemi chiusi)
Per gli insiemi chiusi di qualunque topologia valgono:

1. *$X, \emptyset$ sono chiusi*
2. *intersezione di una famiglia qualsiasi di chiusi è un chiuso*
3. *Unione finita di chiusi è un chiuso*

Dimostrazione
1. ovvio
2. $x \setminus \left(\bigcap_{i\in I} C_i \right) = \bigcup_{X \setminus C_i}^{i\in I}$ *che è unione di aperti*
3. $(X \setminus (C \cup D)) = (X \setminus C) \cap (X \setminus D)$ *che è intersezione di 2 aperti.* □

Osservazione
In uno spazio topologico ci sono insiemi sia aperti che chiusi (clopen = closed + open)

Esempio
$X = \mathbb{R}$
Il sottoinsieme $[0, 1]$ è chiuso in topologia euclidea
è chiuso e aperto in topologia discreta
non è chiuso in topologia banale
non è chiuso in topologia cofinita, e neanche aperto

Definizione 3
Sia X spazio topologico con topologia T. Sia $B \subseteq T$ B è detta base se ogni aperto si può scrivere come unione di elementi di B

Esempi

1. Sia T topologia su $X, \Rightarrow B = T$ è una base
2. Sia T topologia discreta su $X, B = \{\{x\} \mid x \in X\}$ è una base di T
3. Sia $X = \mathbb{R}$, $T =$ topologia euclidea. $B = \{]a, b[| a < b \in \mathbb{R}\}$ è una base di T
   Infatti $B \subseteq T$ perché $]a, b[$ è aperto in topologia euclidea. Inoltre ogni aperto si può scrivere come unione di elementi di B

Dimostrazione
Sia $A \in T$ euclidea su $\mathbb{R}$
$\Rightarrow \forall p \in A \quad \exists \varepsilon > 0$ *t.c.* $\quad]p - \varepsilon, p + \varepsilon[\subseteq A$
$\Rightarrow A = \bigcup_{p \in A}]p - \varepsilon, p + \varepsilon[\in B$ □

Osservazione
Data B base di T topologia, la topologia T è determinata da B Infatti:

$$T = \{\text{ unione arbitraria di elementi di } B\}.$$

> **Proposizione 1**
> *Sia X insieme, $B \subseteq P(X)$ famiglia di sottoinsiemi di X. Esiste T topologia t.c. B è sua base se e solo se*
>
> 1. *X è unione di elementi di B*
> 2. *$\forall A, A' \in B, A \cap A'$ è unione di elementi di B*

Dimostrazione
($\Rightarrow$)
$\exists T$ topologia di cui B è base (per ipotesi)

- *$\Rightarrow X \in T$ e B è base di $T \Rightarrow$ (1) vera*
- *$\Rightarrow A$ e $A' \in T \Rightarrow A \cap A' \in T \Rightarrow$ (2) vera*

($\Leftarrow$)
Definisco $T =$ unioni arbitrarie di elementi di B e verifico che sia una topologia

- *$X \in T, \emptyset \in T \Rightarrow$ (1) vera ($\emptyset \in T$ perché $\emptyset = \emptyset \cup \emptyset \cup \ldots$)*
- *Per costruzione di T, unioni di elementi di T sono elementi di $T \Rightarrow$ (3) vera*
- *$D, E \in T \Rightarrow D = \bigcup_{i \in I} A_i, E = \bigcup_{i \in J} A'_j, \quad A_i, A'_j \in B \ \ \forall i, j$*
  $\Rightarrow D \cap E = \bigcup_{i \in I, j \in J} (A_i \cap A'_j)$

Osservazione:
Ciascuno $A_i \cap A'_j$ è unione di elementi di B.
$\Rightarrow D \cap E$ è unione di elementi di B
$\Rightarrow T$ è topologia (e B sua base per costruzione) $\square$

Osservazione
La proprietà (2) è equivalente a:

$$\forall A, A' \in B, \quad \forall p \in A \cap A' \ \exists D \in B \ \text{ t.c } p \in D \subseteq A \cap A'.$$

Esempio
Sia K un campo, consideriamo $x = \mathbb{K}^n$, Dato $f \in \mathbb{K}[x_1, \ldots, x_n]$
Poniamo $x_f = \{p \in \mathbb{K}^n \mid f(p) \neq 0\}$
$\Rightarrow B = \{x_f \mid f \in \mathbb{K}[x_1, \ldots, x_n]\}$
(esempio: $x = \mathring{,} n = 1, \daleth = \mathring{;} \ f(x) = (x-1)(x-2) \rightsquigarrow x_f = \mathbb{R} \setminus \{1, 2\}$) (esempio: $X = \mathbb{R}, n = 2, \mathbb{K} = \mathbb{R}^2, \ f(x, y) = x^2 + y^2 - 1, x_f = \mathbb{R}^2 \setminus S^1$)

Allora B è base di una topologia T su X
Verifichiamo usando la proposizione precedente
$X = X_f, f = 1$ polinomio costante, allora (1) ok
Prendiamo $A, A' \in B$ studiamo $A \cap A'$
$A = x_f,\ A' = x_g$ con $f, g \in \mathbb{K}[x_1, \ldots, x_n]$, Allora
$A \cap A' = X_{fg}$ è essa stessa un elemento di B quindi (2) ok
per la proposizione precedente $\Rightarrow \exists$ topologia T
La topologia così definita è detta la topologia di Zariski in $\mathbb{K}^n$ **Esempio**
$\mathbb{K} = \mathbb{R}, n = 1$
$\mathbb{R} \setminus \{1, 2\}$ è aperto in topologia euclidea e in topologia di Zariski.
$[0, 1] \subseteq \mathbb{R}$ è chiuso in topologia euclidea, è chiuso in topologia di zariski? Esercizio per casa

Definizione 4
T_1, T_2 topologie su X, T_1 è detta più fine di T_2 se $T_2 \subseteq T_1$

Osservazione
Prese 2 topologie a caso, non è detto che siano confrontabili.
Esempio
La topologia banale è la meno fine di tutte, Quella discreta è la più fine.

Proposizione 2
Siano T_1, T_2 topologie su X. Allora
$T_1 \cap T_2$ è una topologia.
Inoltre $T = T_1 \cap T_2$ è meno fine di T_1 e meno fine di T_2
Dimostrazione
Esercizio lasciato al lettore □

Lezione 3 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-03-04

0.1 Parte interna, chiusura,intorni

Definizione 1
Sia X spazio topologico, sia $D \subseteq X$ un sottoinsieme, la parte interna di D è

$$D^o = \bigcup_{A \subseteq D, A \text{ aperto}} A.$$

La chiusura di D è

$$\overline{D} = \bigcap_{C \supseteq D, C \text{ chiuso}} C.$$

la frontiera di D è

$$\partial D = \overline{D} \setminus D^o.$$

I punti di D^o si dicono interni a D, quelli di $\overline{D}$ si chiamano aderenti a D.

Osservazioni
1) D^o è un aperto e $\overline{D}$ è un chiuso (posso vederlo come l'intersezione tra $\overline{D}$ e il complementare di D^o, che è chiuso)
2) Anche ∂D è chiuso perché
$D = \overline{D} \cap (X \setminus D^o)$ dove $(X \setminus D^o)$ è un chiuso
Esempio
1) $X = \mathbb{R}$ con topologia euclidea. Sia $D = [0, 1]$.
Allora $D^o =]0, 1[$, verifica:
$D^o \supseteq]0, 1[$:
La parte interna di D contiene tutti gli aperti, dato che $]0, 1[$ è un aperto è contenuto.
A $D^o \subseteq]0, 1[$:
supponiamo per assurdo che $D^o \not\subseteq]0, 1[$, allora $0 \in D^o$ oppure $1 \in D^o$ (mi limito a considerare i punti di D perché $D^o \subseteq D$).
Supponiamo $0 \in D^o$, allora esiste $A \subseteq \mathbb{R}$ aperto t.c. $A \subseteq D, A \ni 0$ (è uno degli A della definizione).
Allora esiste $\varepsilon > 0$ t.c. $]0 - \varepsilon, 0 + \varepsilon[\subseteq a \subseteq D$.
assurdo, Analogamente $1 \notin D^o$ quindi vale $\subseteq$
2) $X = \mathbb{R}$ con topologia cofinita $D = [0, 1]$. Allora $D^o = \bigcup_{A \subseteq D, A \text{ aperto}}$
Sia A aperto.
$A \subseteq D$ abbiamo
$A = \emptyset$ oppure $A = \mathbb{R} \setminus \{\text{insieme finito}\}$
Ma questa ultima è impossibile
allora $D^o = \emptyset$ in questa topologia (con questo D)
esercizio: calcolare $\overline{D}$
3) $X = \mathbb{R}$, $T =$ topologia per cui A è aperto $\Leftrightarrow A = \emptyset$ oppure $A \ni 0$
Considero $\overline{\{1\}} = \{1\}$, questo insieme non contiene lo zero, quindi $\{1\}$ è esso stesso un chiuso.
Però $\overline{\{0\}} =?$
I chiusi in T sono $\mathbb{R}$ e i sottoinsiemi che non contengono lo 0. Quindi l'unico insieme chiuso che contiene $\{0\}$ è $\mathbb{R}$, allora $\overline{\{0\}} = \mathbb{R}$

Definizione 2
Sia X spazio topologico, un sottoinsieme di $D \subseteq X$ si dice denso se $\overline{D} = X$

Esempio
$X = \mathbb{R}$ con topologia euclidea,
$D = \mathbb{Q}$. Dimostriamo che è denso
L'unico chiuso che contiene D è X stesso.
Sia $C \subseteq \mathbb{R}$ chiuso con $C \supseteq \mathbb{Q}$
sia $a \in \mathbb{R} \setminus C$ aperto
allora $\exists \varepsilon > 0 \mid]a-\varepsilon, a+\varepsilon[\subseteq \mathbb{R} \setminus C$
allora $]a-\varepsilon, a+\varepsilon[\cap \mathbb{Q} = \emptyset$
assurdo.
Allora a non esiste e $C = \mathbb{R}$. **Osservazione:**
1) Sia $D \subseteq X$ spazio topologico
vale:

$$X \setminus (\overline{D}) = (X \setminus D)^o.$$

Dimostrazione
Usando direttamente la definizione:

$$X \setminus (\overline{D}) = X \setminus (\bigcap_{C \supseteq D, C \text{ chiuso}} C) = \bigcup_{C \supset D, C \text{ chiuso}} (X \setminus C).$$

(ultima eguaglianza per esercizio)

$$= \bigcup_{A = X \setminus C, C \supset D, C \text{ chiuso}} A = \bigcup_{A \text{ aperto}, X \setminus A \supset D} A = \bigcup_{A \text{ aperto}, A \subseteq X \setminus D} A.$$

$\square$

2) D denso
$\Updownarrow$
D interseca ogni aperto non vuoto (esercizio)

Definizione 3
Sia X spazio topologico,
$U \subseteq X, x \in U^o$
Allora U si dice intorno di x.
Equivalentemente, un sottoinsieme $U \subseteq X$ si dice intorno di $x \in X$ se esiste $A \subseteq X$ aperto t.c. $x \in A \subseteq U$

Esempio
$X = \mathbb{R}$ topologia euclidea, $x = 0, U =]-1,1[$ è intorno di x (si prende ad esempio $A = U$, o anche $A =]-1/2, 1/2[$
Anche $V = [-1,1] \cup \{5\}$ è un intonro di 0, ad esempio $A =]-1/2, 16[\cup]3/16, 7/16[$
Osservazione
$U \subseteq X$ è aperto $\Leftrightarrow U = U^o \Leftrightarrow U$ è un intorno di ogni suo punto.

Lemma 1
Siano X spazio topologico, $x \in X$ $D \subseteq X$. Allora $x \in \overline{D} \Leftrightarrow \forall U$ intorno di x vale $U \cap X \neq \emptyset$

Dimostrazione
Supponiamo $x \in \overline{D}$ sia U intorno di x
per assurdo suppongo $D \cap U = \emptyset$ Considero $A \subseteq X$ aperto con $x \in A \subseteq U$
Considero il chiuso $X \setminus A = C$
Abbiamo $C \supseteq D$ perché $D \cap U = \emptyset$ e allora anche $D \cap A = \emptyset A$
Abbiamo $C \supset D$ perché $D \cap U = \emptyset$ e allora anche $D \cap A = \emptyset$ e allora anche $D \cap A = \emptyset$. Cioè C compare nella definizione di D e $C \not\ni x$ perché $x \in A$
Ma $x \in \overline{D}$ quindi x è in tutti i chiusi che contengono D, assurdo
Viceversa, supponiamo D intorno di x, per assurdo però $x \neq \overline{D}$, Allora esiste un chiuso C che contiene D ma non x.
Considero $A = X \setminus C$ è un aperto contenente x. Cioè A è un intorno di x e A non interseca D; assurdo. Quindi $x \in D$ □

Definizione 4 (Famiglia degli intorni, sistema fondamentale)
Sia X spazio topologico e $x \in X$ La famiglia di tutti gli intorni di x si denota con $I(x)$.
Un sottoinsieme $J \subseteq I(x)$ è detto sistema fondamentale di intorni di x (o base locale in x) se $\forall U \in I(x) \quad \exists V \in J \mid V \subseteq U$

Esempi:
$X = \mathbb{R}$ con topologia euclidea.
$x \in \mathbb{R}$ qualsiasi
$J = \{]x - \varepsilon, x + \varepsilon[\mid \varepsilon > 0,\ \varepsilon \in \mathbb{R}\}$
è sistema fondamentale di intorni di x
$J'\{[x - \frac{1}{n}, x + \frac{1}{n}] \mid n \geq 1,\ n \in \mathbb{N}\}$
è un sistema fondamentale di interni di x

$$J'' = \{[x - \frac{1}{n}, x + \frac{2}{n}[\cup \{x + \frac{3}{n}\} | n \geq 1, n \in \mathbb{N}\}.$$

è un sistema fondamentale di riferimento

$$J''' = \{]x - \frac{1}{n}, x + \frac{1}{n}[\cup \{10\} | n \geq 1, n \in \mathbb{N}\}.$$

$(10 \neq x)$
non è un sistema fondamentale di riferimento

0.2 Applicazioni continue

Definizione 5
Siamo X, Y spazio topologico $f : X \to Y$ un'applicazione. f si dice continua se $f^{-1}(A)$ è aperto (in X) $\forall A$ aperto (Y)

Nota (per la tesi)
non iniziare mai una frase con un simbolo, è facile fare errori (lui può ma solo per essere veloce)
Esempi:
1) Se X ha topologia discreta, ogni f è continua (qualsiasi sia Y)
2) Se Y ha una topologia banale, allora $f^{-1}(\emptyset) = \emptyset, f^{-1}(Y) = X$
quindi ogni f è continua.
3) Supponiamo X, Y con topologia cofinita e $f : X \to Y$ iniettiva
$f^{-1}(\emptyset) = \emptyset$,
gli altri aperti sono del tipo $Y \setminus \{$ insieme finito $\} = Y \setminus \{y_1, \ldots, y_n\}$
allora:
$f^{-1}(Y \setminus \{y_1, \ldots, y_n\}) = X \setminus \{f^{-1}(y_1) \cup \ldots \cup f^{-1}(y_n)\}$

Lezione 04 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-03-06

1 Prima lezione di esercizi

mail del tipo degli esercizi: zenobi@altamatematica.it

$$D^2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 | \sqrt{x^2 + y^2} \leq 1\}.$$

$$Q = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 || x| \leq 1, |y| \leq 1\} = [0, 1] \times [0, 1].$$

Lezione 5 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-03-10

0.1 Funzioni continue

Osservazione
Siano X, Y spazi topologici, $f : X \to Y$.
Siano $A \subseteq Y$ un sottoinsieme,

$$X \setminus f^{-1}(A) = \{x \in X \mid f(x) \notin A\} = \{x \in X | f(x) \in Y \setminus A\} = f^{-1}(Y \setminus A).$$

Analogamente, con $A, B \subseteq Y$ e $C, D \subseteq X$

$$f^{-1}(A \cup B) = f^{-1}(A) \cup f^{-1}(B).$$

$$f^{-1}(A \cap B) = f^{-1}(A) \cap f^{-1}(B).$$

$$f(C \cup D) \neq f(C) \cup f(D).$$

$$f^{-1}(f(C)) \supsetneq C.$$

$$f(f^{-1}(A)) = A \cap Im(f).$$

Tornando a $f : X \to Y$
f continua $\Leftrightarrow f^{-1}(A)$ aperto $\forall A \subseteq Y$ aperto $\Leftrightarrow X \setminus f^{-1}(A) = f^{-1}(Y \setminus A)$ chiuso $A \subseteq Y$ aperto $\Leftrightarrow$ con $C = Y \setminus A$ $f^{-1}(C)$ chiuso $\forall C \subseteq Y$ chiuso.

Definizione 1 (Continuità)
Sia $f : X \to Y$ applicazione fra spazi topologici. Sia $p \in X$, f è continua in p se

$$\forall U \subseteq Y \text{ intorno di } f(p)\ \exists V \subseteq X \text{ intorno di } p \text{ t.c } f(V) \subseteq U.$$

Teorema 1
Sia $f : X \to Y$ applicazione fra spazi topologici, sono equivalenti:

1. $\forall p \in X :$ *f è continua in p*
2. $\forall Z \subseteq X :$ $f(\bar{Z}) \subseteq \overline{f(X)}$
3. *f continua*

Dimostrazione
1) $\Rightarrow$ 2) *Sia $p \in \overline{Z}$ so che f è continua in p.*
Voglio dimostrare che

$$f(p) \in \overline{f(Z)}.$$

Formuliamo questa condizione in termini di intorni:
devo dimostrare che in ogni intorno di $f(p)$ ci sono punti di $f(Z)$. Sia $U \subseteq Y$ intorno di $f(p)$ per continuità in p $\exists V \subseteq X$intorno di p tale che $f(V) \subseteq V$
Visto che $p \in \overline{Z}$ esiste $z \in Z$ tale che $z \in V$
Allora $f(z)$ è in U e in $f(Z)$
cioè ogni intorno U di $f(p)$ contenente punti di $f(Z)$, cioè $f(p) \in \overline{f(Z)}$

2) $\Rightarrow$ 3) *Dimostriamo che* $f^{-1}(C)$
è chiuso $\forall C \subseteq Y$ *chiuso. Considero* $f^{-1}(C)$*, voglio dimostrare che è chiuso confrontandolo con* $\overline{f^{-1}(C)}$.
L'ipotesi 2) dice:

$$f(\overline{f^{-1}(C)}) \subseteq \overline{f(f^{-1}(C))} = \overline{C \cap f(X)} \subseteq C.$$

Dato che C *è un chiuso che contiene* $C \cap f(X)$
Allora $\overline{f^{-1}(C)} \subseteq f^{-1}(C)$
D'altronde vale sempre $\overline{f^{-1}(C)} \supseteq f^{-1}(C)$
quindi $\overline{f^{-1}(C)} = f^{-1}(C)$
da cui $f^{-1}(C)$ *è chiuso.*

3) $\Rightarrow$ 1) *suppongo* f *continua, sia* $p \in X$*, sia* $U \subseteq Y$ *intorno di* $f(p)$ *scegliamo* $a \subseteq Y$ *aperto con* $f(p) \in A \subseteq U$
per continuità: $f^{-1}(A)$ *aperto di* X *e contiene* p,
posso prendere $V = f^{-1}(A)$*, intorno aperto di* p*, ed è tale che* $f(V) \subseteq A \subseteq U$
$\square$

Proposizione 1
La composizione di applicazioni continue qualsiasi è continua

Dimostrazione
Siano $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z$
applicazioni fra spazi topologici, suppongo $f \circ g$ *continue,*
dimostriamo che $g \circ f$ *è continua.*
Sia Z *aperto dimostriamo che*

$$(g \circ f)^{-1}(A) \text{ è aperto .}$$

$$(g \circ f)^{-1}(A) = \{x \in X \mid (g \circ f)(x) \in A\}$$
$$= \{x \in X \mid f(x) \in g^{-1}(A)\} = f^{-1}(g^{-1}(A)).$$

g manda aperti in aperti, stesso per f*, segue che la composizione fa lo stesso.* $\square$

Definizione 2
Siano X, Y spazi topologici, $f : X \to Y$.

1. *f si dice omeomorfismo se f è continua, biettiva, e $f^{-1} : Y \to X$ è continua*

2. *X e Y si dicono omeomorfi se esiste $f : X \to Y$ omeomorfismo*

3. *f (non necessariamente omeomorfismo, non necessariamente continua) si dice aperta se $f(A)$ è aperto $\forall A \subseteq X$ aperto, e f si dice chiusa quando $f(C)$ è chiuso $\forall C \subseteq X$ chiuso*

Esempi:
$\mathbb{R}$ con topologia euclidea, $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ applicazione costante $f(x) = q \quad \forall x \in \mathbb{R}$.
Questa f non è aperta, perché $\mathbb{R}$ è aperto in $\mathbb{R}$ e $f(\mathbb{R}) = \{q\}$ non è aperto in topologia euclidea.
Esempio importante:
Applicazione non chiusa.
p : $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$

(x, $y) \to x$
($\mathbb{R}^2, \mathbb{R}$ con topologia euclidea)
Non è chiusa, prendiamo ad esempio $C = \{(x, y) \mid x \cdot y = 1\}$
è un chiuso in $\mathbb{R}^2$, ma $p(C) = \mathbb{R} \setminus \{0\}$ non è chiuso.

C è chiuso di $\mathbb{R}^2$ perché C è uguale a $f^{-1}(\{1\})$ dove
f:R$^2 \to \mathbb{R}$

(x,y) $\to xy$
Infatti f è continua e $\{1\} \subseteq \mathbb{R}$ è un chiuso.

0.2 Spazi metrici

Definizione 3
sia X un insieme e $d : X \times X \to \mathbb{R}$
d si dice distanza se:

1. $d(x, y) \geq 0 \quad \forall x, y \in X$,
   $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$

2. $d(x, y) = d(y, x) \quad \forall x, y \in X$

3. $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$
   $\forall x, y, z \in X$

In tal caso $(X, d)(oX$ stesso $)$ si chiama spazio metrico

Esempio

Sia X insieme, poniamo

$$d(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{se } x = y \\ 1 & \text{se } x \neq y \end{cases} .$$

d è una distanza.

Definizione 4
Sia (X, d) spazio metrico.

1. *La palla aperta di centro x e raggio $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$ è:*
   $B_\varepsilon(x) = \{p \in X \mid d(p, x) < \varepsilon\}$
2. *La topologia indotta da d su X è definita da:*
   A aperto $\Leftrightarrow \ \forall a \in A \ \exists \varepsilon < 0 \mid B_\varepsilon(a) \subseteq A$
   La denotiamo con T_d

Verifica che T_d è topologia

1. $\emptyset, X$ sono aperti: ovvio
2. unione di aperti è aperto: ovvio
3. Siano $A_1, A_2 \in T_d$, verifichiamo che $A_1 \cap A_2 \in T_d$, sia $a \in A_1 \cap A_2$ quindi
   $\exists \varepsilon > 0 \mid B_\varepsilon(a) \subseteq A_1$ e $\exists \delta > 0 \mid B_\delta(a) \subseteq A_2$
   sia $\gamma = \min\{\varepsilon, \delta\}$ allora soddisfa $B_\gamma(a) \subseteq A_1 \cap A_2$

Lemma 1
Sia (X, d) spazio metrico e T_d la topologia indotta da d

1. $\forall p \in X \ \forall \varepsilon > 0 \quad B_\varepsilon(p) \in T_d$
2. $B = \{B_\varepsilon(p) \mid p \in X, \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}\}$
   è una base di T_d
3. *Un sottoinsieme $U \subseteq X$ è intorno di $p \in X$ se e solo se*
   $\exists \varepsilon > 0 \ | B_\varepsilon(p) \subseteq U$

Dimostrazione
Per esercizio. □

Osservazione
Gli spazi metrici in generale si comportano in modo simile a $\mathbb{R}n$ con distanza euclidea, ma attenzione: non tutto è uguale, ad esempio se (X, d) è uno spazio metrico e $x \in X$:

$$\{p \in X \mid d(x, p) \leq \varepsilon\}.$$

con $\varepsilon > 0$ fissato, è un chiuso di X (verifica per esercizio) ma non è sempre la chiusura di $B_\varepsilon(x)$.

Ad esempio $X = \mathbb{R}$ con distanza $d(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{se } x = y \\ 1 & \text{se } x \neq y \end{cases}$
Considero $\{p \in \mathbb{R} \mid d(p,x) \leq 1\} = \mathbb{R}$
ma $B_1(x) = \{x\}$
Questo vale $\forall x \in \mathbb{R}$
cioè ogni ogni singoletto è aperto, allora T_d è discreta, quindi $\{x\}$ è anche chiuso.
Cioè $B_1(x) = \{x\}$.
Osservazione:
Siano X, Y spazi metrici sia $p \in X$
$f : X \to Y$, allora f è continua in p
(come applicazione fra spazi topologici, dove su X e Y metto le topologie indotte dalle distanze) $\Leftrightarrow$ $\forall \varepsilon > 0 \;\; \delta > 0 \mid$ se $d(x,p) < \delta$ allora $d(f(x), f(p)) < \varepsilon$
Verifica per esercizio

Corollario 1
Siano d, h distanze su uno stesso insieme X.
Allora T_d è più fine di T_h se $\forall p \in X \;\; \forall > 0 \;\; \exists \delta > 0 \mid B^d_\delta(p) \subseteq B^h_\varepsilon(p)$

Dimostrazione
Usiamo $id_X : X \to X$ dove nel dominio prendiamo d e T_d, e nel codominio la distanza h e T_h. Con questa scelta l'identità su X è continua $\Leftrightarrow T_d \supseteq T_h$
La carindalità di Id_X è equivalente alla condizione con ε e δ per l'osservazione.
$\square$

Definizione 5 (Distanze equivalenti)
Date distanze d, h su un insieme X, esse si dicono equivalenti se $T_d = T_h$

Definizione 6 (Spazio topologico metrizzabile)
Sia X uno spazio topologico con topologia T. Se esiste una distanza d su X tale che $T = T_d$ allora X si dice metrizzabile.

0.3 Sottospazi topologici

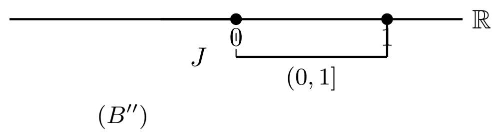
Definizione 7
Sia X spazio topologico, sia $Y \subseteq X$ sottoinsieme qualsiasi, allora su Y è definita la topologia di sottospazio ponendo $A \subseteq Y$ aperto in topologia di sottospazio $\Leftrightarrow \exists B \subseteq X$ aperto in X tale che $A = B \cap Y$

Esempi:
1) $X = \mathbb{R}$ con topologia euclidea
$Y = [0, 1]$
Allora Y è aperto in topologia di sottospazio
$A = Y$ soddisfa $A = B \cap Y$

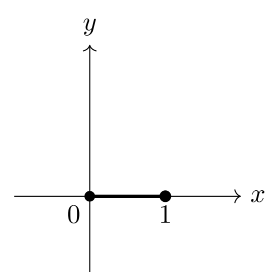
Anche $I =]\frac{1}{2}, \frac{2}{3}[\subseteq Y$ è aperto in topologia di sottospazio basta prendere $B' = I$ per avere $I = B' \cap Y$
Considero $[0, \frac{1}{2}[= J \subseteq Y$
non è aperto in $\mathbb{R} = X$, ma è aperto in Y in topologia di sottospazio, basta prendere $B'' =]-1, \frac{1}{2}[$ è aperto in X e soddisfa

$$J = B'' \cap Y.$$

Idea intuitiva:



J non è aperto in $\mathbb{R}$ perché $\forall \varepsilon > 0 \exists$ punti di $\mathbb{R}$, a distanza $< \varepsilon$ da 0, punti che non sono in J.
Ma J aperto in Y in topologia di sottospazio perché Y non contiene tali punti
2) $X = \mathbb{R}$ con topologia euclidea, sia $Y = \mathbb{Z}$ con topologia di sottospazio, Ad esempio $A =]-100, 23[\cap Y = \{-99, -98, \ldots, 22\}$
Anche $]-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}[\cap \mathbb{Z} = \{0\}$ è aperto.
Analogamente
$]n - \frac{12}{,} n + \frac{1}{2}[\cap \mathbb{Z} = \{n\} \ \ \forall n \in \mathbb{Z}$ è aperto in $\mathbb{Z}$ in topologia di sottospazio. Quindi la tipologia di sottospazio è discreta.
3) $X = \mathbb{R}^2$ con topologia euclidea, $Y = \mathbb{R} \times \{0\}$, l'asse x.



allora $A =]0, 1[\times \{0\}$ è aperto in topologia di sottospazio, ad esempio $B =]0, 1[\times \mathbb{R}$
Osservazione Verifichiamo che la topologia di sottospazio è una topologia:

$$T_Y = \{A \subseteq Y \mid \exists B \subseteq X \ \text{ aperto t.c.} B \cap Y = A\}.$$

Assiomi di topologia

1. $\emptyset = \emptyset \cap Y$, $Y = X \cap Y$
2. Siano $A_i, i \in I$ elemento di T_Y, verifica che $\bigcup_{i \in I} A_i$ è in T_y
   Scegliamo $B_i \ \ \forall i \in I$ aperto in X t.c. $\ A_i = B_i \cap Y$

$\bigcup_{i\in I} A_i = \bigcup_{i\in I}(B_i \cap U) = \bigcup_{i\in I} B_i \cap Y$ dove il primo termine è aperto in X
da cui $\bigcup_{i\in I} A_i \in T_Y$.

3. Siano $A_1, A_2 \in T_Y$, scegliamo B_1, B_2 aperti in X con $A_i = B_i \cap Y \quad \forall i \in \{1, 2\}$ allora
$A_1 \cap A_2 = (B_1 \cap Y) \cap (B_2 \cap Y) = B_1 \cap B_2) \cap Y$ dove il primo termine è aperto in X
quindi $A_1 \cap A_2 \in I_y$

Osservazione.
Sia $C \subseteq Y$ chiuso in topologia di sottospazio. Allora $A = Y \setminus C$ è scrivibile come $A = B \cap Y$ con B aperto in X, Allora $D = X \setminus B$ è chiuso in X, e vale $D \cap Y = C$
Cioè se C è chiuso in topologia di sottospazio allora esiste $D \subseteq X$ chiuso tale che $C = D \cap Y$.
Vale il viceversa se il sottoinsieme C di Y è scrivibile come $C = D \cap Y$ con $D \subseteq X$ chiuso, allora C è chiuso in topologia di sottospazio (esercizio)

Lezione 6 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-03-11

0.1 boh

Osservazione:
Sia X spazio topologico, $Y \subseteq X$ con topologia di sottospazio T_Y .
Considero l'inclusione di Y in X come applicazione

$$\begin{aligned} i : & Y \to X \\ & y \to y \end{aligned}$$

i è costruita (mettendo su Y la topologia T_Y). Verifica: sia $B \subseteq X$ aperto
la controimmagine è $i^{-1}(B)$ Questo è aperto in topologia di sottospazio.
Sia T una topologia su Y (non necessariamente $= T_Y$), suppongo che $i : Y \to X$ sia continua anche usando T come topologia su Y
Allora $\forall B \subseteq X$ aperto, $i^{-1}(B)$ è aperto in Y cioè $i^{-1}(B) \in T$.
Al variare di B aperto in X, gli insiemi $i^{-1}(B)$ formano T_Y, quindi $T_y \subseteq T$.
Possiamo considerare la famiglia di tutte le topologie su Y per cui l'inclusione è continua. L'intersezione di esse è contenuta in T_Y perché T_Y è una di esse, e contiene T_Y perché ogni T siffatta contiene T_Y.
Quindi T_Y è la topologia meno fine fra quelle per cui i è continua.

Proposizione 1
Sia $f : X \to Z$ applicazione continua fra spazi topologici, sia $Y \subseteq X$ con topologia di sottospazio, allora $f|_Y : Y \to Z$ è continua

Dimostrazione
Usiamo l'inclusione $i : X \to Y$ e osserviamo $f|_Y : Y \to Z$ concateno con

$$f \circ i : Y \xrightarrow{i} X \xrightarrow{f} Z.$$

f e i sono continue, lo è anche $f \circ i$ □

Proposizione 2
Siano X spazio topologico, $Y \subseteq X$ con topologia di sottospazio, Z spazio topologico e $f : Z \to Y$.
Consideriamo l'estensione del codominio di f da Y a X che è l'applicazione $i \circ f : Z \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{i} X$
Allora f è continua se e solo se $i \circ f$ è continua.

Dimostrazione
($\Rightarrow$) *ovvio poiché $i \circ f$ è composizione di applicazioni continue*
($\Leftarrow$) *Sia $A \subseteq Y$ aperto, scegliamo $B \subseteq X$ aperto tale che $B \cap Y = A$.*
Allora $f^{-1}(A) = (i \circ f)^{-1}(B)$
poiché chiedere che $z \in Z$ vada in A tramite f è equivalente a richiedere che vada in B.

Allora $f^{-1}(A)$ è aperto per continuità di $i \circ f$ $\square$

Osservazione

Data in generale $f : Z \to X$ spesso la si restringe all'immagine

$$\begin{aligned} \tilde{f} : & Z \to Im(f) \\ & z - f(z) \end{aligned}$$

vale f continua $\Leftrightarrow \tilde{f}$ continua, perché posso considerare l'inclusione

$$i : Im(f) \to X.$$

e allora $f = i \circ \tilde{f}$

Esempio:

$X = \mathbb{R}$ con topologia euclidea.

$Y = [0, 1[$ con topologia di sottospazio

$$Z =]0, 1[\quad (\subseteq Y).$$

Sia verifica facilmente (esercizio) che la chiusura di Z in Y è $[0, 1[$e la chiusura di Z in X è $[0, 1]$

Le chiusure sono diverse, ma

$$[0, 1[= [0, 1] \cap Y.$$

dove il primo intervallo è in Y e il secondo intervallo in X

Questo si generalizza.

Lemma 1

Sia X spazio topologico, $Y \subseteq X$ con topologia di sottospazio, $Z \subseteq Y$ la chiusura di Z in Y è uguale a Y intersecato la chiusura di Z in X

Dimostrazione

Chiusura di Z in Y $= \bigcap_{\substack{C \subseteq Y, \\ C \text{ chiuso in } Y, \\ C \supseteq Z}} C = \dots$

Per ogni tale C scelgo un $D \subseteq X$ chiuso in X tale che $C = D \cap Y$

$$\begin{aligned} \dots = & \bigcap_{\substack{C \subset U, \\ C \text{ chiuso in } Y, \\ C \supseteq Z, \\ D \subseteq X, \\ D \text{ chiuso in } X \\ \text{t.c. } D \cap Y = C}} D \cap Y. \\ = & \bigcap_{\substack{D' \subseteq X, \\ D' \text{ chiuso in } X, \\ D' \supset Z}} D' \cap Y. \end{aligned}$$

L'ultima uguaglianza vale perché ogni D della prima intersezione compare fra i D della seconda intersezione, Per ogni D' della seconda seconda intersezione considero $C = D' \cap Y$ che è in Y, chiuso in Y, contenente Z, quindi compare fra i C della prima intersezione; ad esso corrisponde un D della prima intersezione, che soddisfa $D \cap Y = C = D' \cap Y$.
Quindi per ogni D' della seconda intersezione esiste un D della prima con la stessa intersezione con Y, ovvero $D \cap Y = D' \cap Y$, Quindi vale l'uguaglianza.
L'uguaglianza prosegue:

$$= \left(\bigcap_{\substack{D' Z, \\ D' \ chiuso \ in \ X, \\ D' \supseteq Z}} D' \right) \cap Y.$$

dove la parentesi è la chiusura di Z in X □

Osservazione
Attenzione: non vale un enunciato analogo con la parte interna.
Ad esempio $X = \mathbb{R}$ cn topologia euclidea $Y = \mathbb{Z}$ $Z = \{0\}$
La parte interna di Z in X è vuota, perché Z non contiene alcun aperto di $\mathbb{R}$
Invece la topologia di sottospazio su Y è la topologia discreta e Z è aperto in Y.
Quindi Z è la propria parte interna come sottoinsieme di Y.

Definizione 1
Sia $f : X \Rightarrow Y$ un'applicazione continua fra spazi topologici, f è un'inversione topologica se la restrizione

$$\tilde{f} : X \to f(X)$$
$$x \to f(x)$$

è un omeomorfismo, dove su $f(X) \subseteq Y$ metto la topologia di sottospazio.

Esempio
1) Considero

$$\mathbb{R} \to \mathbb{R}$$
$$x \to (x, 0)$$

(qui $\mathbb{R}, \mathbb{R}^2$con topologia euclidea) è un immersione, la verifica è per esercizio.
2)

$$\text{f} : [0{,}2\pi[\to \mathbb{C}$$
$$\text{t} \to e^{it}$$

Su $[0, 2\pi[\subseteq \mathbb{R}$
metto la topologia di sottospazio indotta dalla topologia euclidea su $\mathbb{R}$, su $\mathbb{C} = \mathbb{R}^2$ metto la topologia euclidea
È continua, iniettiva e $f([0, 2\pi[) = S^1 = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$
Questa f non è un'immersione, infatti $[0, \pi[$ è aperto nel dominio, ma $f([0, 2[)$ non è aperto in S_1 con topologia di sottospazio. quel chiuso dovrebbe essere interesezione tra la circonferenza e un aperto di $\mathbb{R}^2$, Ciò non è possibile perchè ci sarebbe un intorno su un estremo della circonferenza.

0.2 Prodotti topologici

Siano P, Q spazi topologici.
vogliamo definire una topologia "naturale" su $P \times Q$.
Esempio:
Considero $P = Q = \mathbb{R}$ con topologia euclidea

$$P \times Q = \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \mathbb{R}^2.$$

La topologia su $\mathbb{R}^2$ sarà quella euclidea. Considero ad esempio

$$U \subseteq \mathbb{R} \text{ aperto}, \quad V \subseteq \mathbb{R} \text{ aperto}.$$

il prodotto $U \times V$ sarà aperto in $\mathbb{R}^2$, posso pensare che questa sia quindi la mia topologia, ma vediamo qualche esempio con la topologia euclidea.
Ad esempio $U =]a, b[\quad V =]c, d[$, allora $UV =]a, b[\times]c, d[$ è un rettangolo aperto
Anche un disco aperto in $\mathbb{R}^2$ è aperto in topologia euclidea, ma non riesco a scriverlo con questo prodotto $U \times V$ con $U \subseteq \mathbb{R},\ V \subseteq \mathbb{R}$
Potrei prendere

$$B = \{U \times V \mid {}^{U \subseteq \mathbb{R} \text{ aperto}}_{V \subseteq \mathbb{R} \text{ aperto}},\}.$$

come base per la topologia su $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$

Definizione 2
Siano P, Q spazi topologici, la topologia prodotto su $P \times Q$ è la meno fine fra quelle per cui le proiezioni:

$$\begin{aligned} p :& P \times Q \to P \\ &(a, b) \to a \\ q :& P \times Q \to Q \\ &(a, b) \to b \end{aligned}$$

Sono continue.

Osservazione
Esistono topologie su $P \times Q$ tali che p e q sono continue, per esempio la topologia discreta su $P \times Q$
La topologia prodotto è l'intersezione di tutte le topologia per cui p e q sono continue.

Lezione 7 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-03-17

0.1 Cotntinuo sulla topologia prodotto

Teorema 1
Siano P, Q spazio topologico, sia $P \times Q$ con topologia prodotto

1. $B = \{U \times V \mid U \subseteq P \quad \text{aperto}, V \subset Q \text{ aperto}\}$ *è una base della topologia prodotto.*

2. *Per ogni* $x_0 \in P, y_0 \in Q$ *le applicazioni*

$$p|_{P \times \{y_0\}} : P \times \{y_0\} \to P$$
$$(x, y_0) \to x$$

$$p|_{\{x_0\} \times Q} : \{x_0\} \times Q \to P$$
$$(x_0, y) \to y$$

sono omomorfismi (dove $P \times \{y_0\}$ *e* $\{x_0\} \times Q$ *hanno topologia di sottospazio)*

3. *le proieizoni* $p : P \times Q \to P$
$q : P \times Q \to Q$
sono aperte

4. *Sia* X *spazio topologico* $f : X \to P \times Q$
allora f *è continua se e solo se lo sono le sue componenti* $p \circ f$ *e* $q \circ f$

Dimostrazione
1) Dimostriamo prima di tutto che esiste una topologia T *su* $P \times Q$ *che ha* B *per base.*
Verifichiamo le condizioni date in una proposizione precedente
a) $P \times Q$ *dev'essere unione di elementi di* B, *è vero perché* $P \times Q \in B$
b) Siano $U, U' \subseteq P$ *aperti,* $V, V' \subseteq Q$ *aperti, allora l'intersezione.*

$$(U \times V) \cap (U' \times V').$$

(è l'intersezione di due elementi qualsiasi di B*) si deve poter scrivere come unione di elementi di* B:

$$(U \cap U') \times (V \cap V').$$

quindi questa intersezione è un elemento di B.
Abbiamo dimostrato che esiste T *che ha* B *per base.*
Confrontiamo T *con la topologia con la topologia prodotto. Prima cosa: dimostriamo che* p *e* q *sono continue se su* $P \times Q$ *mettiamo* T.
Vediamo $p : P \times Q \to P$

sia $A \subseteq P$ aperto, allora $p^{-1}(A) = A \times Q$
è un aperto di T, Quindi p è continua.
Analogamente q è continua.
Segue T è più fine della topologia prodotto (per definizione della topologia prodotto).
T topologia prodotto
Dimostriamo $T \subseteq$ topologia prodotto
Dimostriamo che $B \subseteq$ topologia prodotto
Siano $U \subseteq P$ aperto, $V \subseteq Q$ aperto
quindi $Y \times V \in B$ allora:

$$U \times Q = p^{-1}(U).$$

dev'essere aperto anche in topologia prodotto.
Anche $P \times V = q^{-1}(V)$ dev'essere aperto in topologia prodotto.

$$U \times V = (U \times Q) \cap (P \times V).$$

unione arbitraria di aperti è aperta, quindi $T \subseteq$ topologia prodotto.
Quindi B è base della topologia prodotto

2) Dimostriamo che

$$p|_{P \times \{y_0\}} P \times \{y_0\} \to P.$$

è omeomorfismo.
Quest'applicazione è biettiva, è continua perché è restrizione (su un sottospazio) di un'applicazione continua
Dobbiamo dimostrare che l'inversa è continua

$$\begin{aligned} \varphi : P &\to P \times \{y_0\} \\ x &\to (x, y_0) \end{aligned}$$

Basta verificare che le controimmagini di elementi della base sono aperti (esercizi settimanali).
Inoltre una base del sottospazio $P \times \{y_0\}$ è ottenuta intersecando gli elementi elementi dalla base B al sottospazio (esercizi settimanali). Sia $U \times V \in B$ ($U \subseteq P$ aperto, $V \subseteq Q$ aperto) e considero

$$A = (U \times V) \cap (P \times \{y_0\}).$$

Abbiamo $A = \begin{cases} U \times \{y_0\} & se\ y_0 \in V \\ \emptyset & se\ y_0 \notin V \end{cases}$

allora $\varphi^{-1}(A) = \begin{cases} U & se\ y_0 \in V \\ \emptyset & se\ y_0 \notin V \end{cases}$ *In entrambi i casi ho un aperto di P*

segue che $p|_{R \times \{y_0\}}$ è un omeomorfismo. Analogamente lo è anche $q|_{\{x_0\} \times Q}$

3)Dimostriamo che p, q sono aperti

Su $A \subseteq P \times Q$ aperto considero

$$A = \bigcup_{y_0 \in Q} A \cap (P \times y_0\}).$$

$$p(A) = \bigcup_{y_0 \in Q} p(A \cap (P \times y_0\})).$$

$$= \bigcup_{y_0 \in Q} p|_{P \times \{y_0\}}(A \cap (P \times \{y_0\})).$$

Ora l'insieme $A \cap (P \times \{y_0\})$ è aperto nel sottospazio $P \times \{y_0\}$, e $p|_{P \times \{y_0\}}$ è omemorfismo.
quindi $p|_{P \times \{y_0\}}(A \cap (P \times \{y_0\}))$ è aperto di P.
Segue: $p(A)$ aperto in P. Cioè p è aperta analogamente q è aperta
4) Abbiamo Se f è continua allora lo sono le mappe $p \circ f, q \circ f$
Viceversa, supponiamo $p \circ f$ continua. ALlora dimostriamo f continua. Di nuovo usiamo B, quindi $U = \subseteq P$ aperto, $V \subseteq Q$ aperto, dimostriamo che $f^{-1}(U \times V)$ è aperto in X. Abbiamo

$$f^{-1}(U \times V) = (p \circ f)^{-1}(U) \cap (q \times f)^{-1}(V).$$

è aperto per continuità di $p \circ f$ e $q \circ f$

$\square$

Osservazione
Siano P, Q spazi topologici, siano B_P base della topologia di P e B_Q base della topologia di Q allora

$$\{U \times V | U \in B_P, \quad V \in B_Q\}.$$

è una base della topologia prodotto.
Esempi
1) $P = Q = \mathbb{R}$ con topologia euclidea prendiamo le basi $B_P = B_Q = \{]a, b[\mid a, b \in \mathbb{R} \ a < b\}$ della topologia euclidea su $\mathbb{R}$
Per l'osservazione $\{]a, b[\times]c, d[\ |a, b, c, d \in \mathbb{R} \ \ a < b, \ c < d\}$
è base della topologia prodotto su $\mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$
Sappiamo anche che questa è una base della topologia euclidea su $\mathbb{R}^2$ quindi questa è la topologia prodotto.
ANalogamente, la topologia euclidea su $\mathbb{R}^n$ è la topologia prodotto su

$$\mathbb{R}^n = \mathbb{R}^{n-1} \times \mathbb{R}.$$

2) Considero $\mathbb{R}$ con topologia di Zarinksi, allora la topologia prodtto su

$$\mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}.$$

dove ogni $\mathbb{R}$ ha la topologia di Zarinski non è la topologia di Zarinksi su $\mathbb{R}^2$

Definizione 1 (Spazi di Hausdoff)
Uno spazio topologico X si dice di Hausdoff (o T2) se $\forall x, y \in X$ *con* $x \neq y$, $\exists U$ *intorno di* x, V *intorno di* y *t.c.* $U \cap V = \emptyset$.

Esempi
1) Ogni spazio metrico è T2, basta prendere $U = B_{d(x,y)/2}(x)$ $V = B_{d(x,y)/2}(y)$
2) $X = \emptyset$ di Hausdoff
3) X qualsiasi con topologia banale allora:

- se $|X| \leq 1$ allora X è T2
- se $|X| \geq 2$ allora X non è T2

4) Se X ha topologia cofinita.

- se X è un insieme finito allora la topologia è discreta e X è T2
- se X è infinito allora X non è T2.

Osservazione
Dati $x, y \in X$ con $x \neq y$
se esistono intorni U di x, V di y con $U \cap V = \emptyset$ allora esistono aperti $(x \in) A (\subseteq U)$ e $(y \in) B (\subseteq V)$ e sono disgiunti.
Quindi X è T2 se e solo se $\forall x, y \in X$ con $x \neq y$ $\exists U$ intorno aperto di x V intorno aperto di y con $U \cap V = \emptyset$

Lemma 1
Se X spazio topologico è T2, tutti i suoi sottoinsiemi finiti sono chiusi.

Dimostrazione
Sia $x \in X$ *per ogni* $y \in X$ *scegliamo intorni aperti*

$$U \ni x, V \ni y.$$

con $U \cap V = \emptyset$ $V \not\ni x$, *quindi* $V \subseteq (X \setminus \{x\})$
Cioè $X \setminus \{x\}$ *è intorno di ogni suo punto.*
Segue $\{x\}$ *è chiuso.*
Allora tutti i sottoinsiemi finiti sono chiusi $\square$

Proposizione 1
Sottospazi e prodotti di spazi di Hausdoff sono di Hausdoff

Dimostrazione
Sia X T2 sia $Y \subseteq X$ *sottospazio. Siano* $y, y' \in Y$ *con* $y \neq y'$
Scegliamo $U \ni y, U' \ni y'$ *aperti in X e disgiunti* $U \cap U' = \emptyset$
allora $U \cap Y$ *e* $U' \cap Y$ *sono aperti in Y, disgiunti, e contengono rispettivamente* y *e* y', *Allora Y è T2.*

Siano ora P, Q spazi topologici, entrambi T2, siano $(a, b) \neq (c, d) \in P \times Q$
Supponiamo $a \neq c$
siano $U \ni a, U' \ni x$ aperti in P, $U \cap U' = \emptyset$. Allora $U \times Q$ e $U' \times Q$ sono aperti disgiunti contenenti (a, b) e (c, d) rispettivamente.
Se $a = c$ allora $b \neq d$ e la dimostrazione è analoga con spazi del tipo $P \times U, P \times U'$
$\square$

Teorema 2
Sia X spazio topologia, considero $X \times X$ con topologia prodotto e la diagonale $\Delta = \{(a, a) \in X \times X \mid a \in X\}$
Vale: X T2 se e solo se Δ è chiusa in $X \times X$

Idea intuitiva dell'enunciato, parte $\Rightarrow$.
sia $x \in X$ un punto che "si muove" (ad esempio è un termine di una successione).
Supponiamo x "tende" ad un limite $a \in X$, cioè entra progressivamente in ogni intorno di a. Se x "tende" anche a $b \in X$ e X è T2, allora $a = b$ (perché se $a \neq b$ allora hanno intorni disgiunti).
Allora potrò dire che (x, x) "tende" alla coppia (a, b) e la proprietà T2 implica $a = b$, cioè la diagonale $\{(x, x) \mid$ è chiusa $\}$

Dimostrazione
$\Rightarrow$ suppongo X T2, dimostriamo che $(X \times X) \setminus \Delta$ è aperto in topologia prodotto
Sia $(x, y) \in (X \times X) \setminus \Delta$, cioè $x \neq y$
Siano U, V aperti di X disgiunti con $U \ni x, V \ni y$, allora $U \times V$ è aperto in $X \times X$, contiene (x, y)
Inoltre $(U \times V) \cap \Delta = \emptyset$, perché

$$(U \times V) \cap \Delta = \{(z, z) \in X \times X \mid z \in U \quad z \in V\}.$$

è vuoto perché z apparterrebbe a $U \cap V = \emptyset$
Quindi $(X \times X) \setminus \Delta$
è intorno di ogni suo punto, cioè è chiuso
($\Leftarrow$) Suppongo Δ chiuso, cioè $(X \times X) \setminus \Delta$ aperto di $X \times X$. Siano $x \neq y$ di X, allora $(x, y) \in (X \times X) \setminus \Delta$
Per la base B vista per la topologia prodotto esiste $U \times V \subseteq (X \times X) \setminus \Delta$
tale che $U \times V$ aperto di $X, U \times V \ni (x, y)$. Allora $U \cap V = \emptyset$
(ragionamento di prima, non esistono punti come z). Inoltre $x \in U$, $y \in V$.
Segue X è T2. $\square$

Osservazione
Ricordo $C = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid xy = 1\}$
è chiusa perché $C = f^{-1}(\{1\})$
dove

$$\text{f: } \mathrm{R}^2 \to \mathbb{R}$$
$$(x, y) \to xy$$

Pi u in generale siano X, Y spazi topologici $f : X \to Y$ continua. Suppongo Y di Hausdoff e sia $y \in Y$
Allora $\{y_0\}$ è chiuso in Y, quindi

$$\{x \in X \mid f(x) = y_0\} = f^{-1}(\{y_0\}) \quad \text{è chiuso.}$$

Corollario 1
X, Y spazi topologici.
Siano $f, g : X \to Y$ continue, e l'insieme

$$C = \{x \in X \mid f(x) = g(x)\}.$$

Se Y è $T2$ allora C è chiuso in X.

Dimostrazione
Consideriamo

$$\varphi : X \to Y \quad \times \quad Y$$
$$x \to (f(x), g(x))$$

Per il primo teorema della lezione, questa è continua. Allora $C = \varphi^{-1}(\Delta)$ che è la diagonale in $Y \times Y$
Ma la diagonale è chiusa quindi C è chiuso $\square$

Lezione 8 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-03-18

0.1 Spazi topologici connessi

Esempio
$\mathbb{R}$ con topologia euclidea,
$X = [0,1] \cup [2,3]$ sottospazio
intuitivamente è fatto da due "pezzi" gli intervalli $[0,1]$ e $[2,3]$
Come distinguere i "pezzi di X da altri sottospazio ad esempio $[0,1/3]$?
$[0,1/3]$ è chiuso in X.
anche $[0,1]$ e $[2,3]$ sono chiusi in X
$[0,1/2]$ non è aperto in X.
Invece $[0,1]$ è anche aperto in X in topologia di sottospazio, infatti $[0,1] \in X\cap\ ]-1,3/2[$, dove il secondo è aperto in $\mathbb{R}$
Anche $[2,3]$ è aperto in X

Definizione 1
Uno spazio topologico si dice connesso se gli unici sottospazi contemporaneamente aperti e chiusi sono solo $\emptyset$ e X Se X non è connesso si dice sconnesso

Esempio
1) Se $X = \emptyset$
allora X è connesso
2) se $|X| = 1$ è connesso
3) Anche se X ha topologia banale (qualsiasi cardinalità) è connesso
4) Se $|X| \geq 2$ e la topologia discreta allora X è connesso
5) $X = [0,1] \cup [2,3]$ di prima, è sconnesso ($[0,1]$ è contemporaneamente aperto e chiuso)
6) $X = \mathbb{R} \setminus \{0\}$ (topologia di sottospazio da $\mathbb{R}$ con topologia euclidea)
è sconnesso ad esempio $]-\infty,0[$ è aperto e chiuso in X.

$$]-\infty,0[= \begin{cases} X\cap]-\infty,0[& \text{(aperto di } \mathbb{R}) \\ X\cap]-\infty,0] & \text{(chiuso di } \mathbb{R}) \end{cases}$$

7) $\mathbb{Q} = X$ (con topologia di sottospazio da $\mathbb{R}$ con topologia euclidea)
è sconnesso, ad esempio $\mathbb{Q}\cap]-\infty,\sqrt{2}[$ è contemporaneamente aperto in $\mathbb{Q}$
è aperto ovviamente in topologia di sottospazio
ed è anceh chiuso $\mathbb{Q}\cap]-\infty,\sqrt{2}[= \mathbb{Q}\cap]-\infty,\sqrt{2}]$ chiuso in $\mathbb{R}$

Lemma 1
Sia X spazio topologico allora sono equivalenti:

1. *X sconnesso*
2. *esistono aperti disgiunti non vuoti A_1, A_2 tali che $X = A_1 \cup A_2$*
3. *Esistono chiusi disgiunti non vuoti tali che $X = C_1 \cup C_2$*

Dimostrazione
1) $\Rightarrow$ 2) *Sia $A \subseteq X$ aperto e chiuso $A \notin \{\emptyset, X\}$, basta porre $A_1 = A,\ A_2 = X \setminus A$*

2) $\Rightarrow$ 3) *Poniamo* $C = A_1, C_2 = A_2$
3) $\Rightarrow$ 1) *Basta prendere* $A = C_1$ *è anche aperto, non vuoto* $\neq X$ *perché* $C_2 \neq 0$ $\square$

Nota
D'ora in poi, per i sottoinsiemi di $\mathbb{R}^n$ daremo per scontata la topologia di sottospazio indotta dalla topologia euclidea su $\mathbb{R}^n$

Teorema 1
$[0,1]$ *è connesso*

Dimostrazione
Suppongo per assurdo $[0,1]$ *sconnesso, usiamo il 3) del lemma, quindi esistono chiusi non vuoti disgiunti* C, D *tale che* $[0,1] = C \cup D$
Possiamo assumere che $0 \in C$ *(altrimenti scambio i nomi)*
Consideriamo $d = \inf D$*, allora* $d \in \mathbb{R}$ *perché* D *è limitato*
Visto che D *è chiuso* $d = \min D$
Inoltre $d \neq 0$ *poiché* $C \cap D = \emptyset$
Segue $[0, d[\subseteq C$ *ma* C *è chiuso e* d *è aderente a* $[0, d[$ *poiché* $d \in C$ *assurdo* $\square$

Lemma 2
Sia X *spazio topologico, sia* $Y \subseteq X$ *sottospazio connesso, sia* $A \subseteq X$ *sottoinsieme aperto e chiuso.*
Allora $Y \subseteq A$ *oppure* $Y \cap A = \emptyset$

Dimostrazione
$A \cap Y$ *è contemporaneamente aperto e chiuso in topologia di sottospazio quindi* $A \cap Y = Y$ *oppure* $A \cap Y = \emptyset$ $\square$

Definizione 2
Uno spazio topologico X *si dice connesso per archi se*
$\forall p, q \in X \exists \alpha : [0,1] \to X$ *continua tale che* $\alpha(0) = p, \alpha(1) = q$ *Una tale* α *è detto cammino da* p *a* q

Esempio
1) $X = \mathbb{R}^n$è connesso per archi, ad esempio.
$\alpha(t) = tq + (1-t)p$
percorre il segmento da p a q
2) $S^n = \{p \in \mathbb{R}^{n+1} \mid ||p|| = 1\}$
sfera n-dimensionale
$S^{-1} = \emptyset \subseteq \mathbb{R}^0 = \{0\}$
$S^0 = \{1, -1\} \subseteq \mathbb{R}$ sconnesso
$S^1 = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 = 1\}$
Ogni S^n è connesso per archi per ogni $n \geq 1$

Un cammino da p a q è dato ad esempio da $\alpha(t) = (\cos(t \cdot s + (1-t)$
DA COMPLETARE
Suppongo $n \geq 2$, dimostro che S^n connesso per archi
Scegliamo $V \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$ sottospazio vettoriale di dimensione 2 contenente p e q. Esiste un isomorfismo di spazi vettoriali $\varphi : V \to \mathbb{R}^2$ che preserva il prodotto scalare (quindi la norma) allora $\varphi(V \cap S^n) = S^1$
Scelgo β cammino tra $\varphi(p)$ e $\varphi(q)$ allora $\alpha = \varphi^{-1} \circ \beta$ è camino tra p e q
3) Sia $X \subseteq \mathbb{R}^n$ sottoinsieme connesso, allora è connesso per archi

Teorema 2
Sia $f : C \to Y$ applicazione continua fra spazi topologici

1. *Se X è connesso allora $f(X)$ è connesso*
2. *Se X è connesso per archi allora $f(X)$ è connesso per archi*

Dimostrazione
Supponiamo per assurdo $f(x)$ sconnesso, quindi esistono aperti non vuoti disgiunti $A, B \subseteq f(X)$ tale che $f(X) = A \cup B$
Supponiamo che la restrizione $\tilde{f} : X \to f(X)$ è continua
Allora $f^{-1}(A)$ e $f^{-1}(B)$ sono aperti in X, non vuoti e disgiunti

$$f^{-1}(A) \cap f^{-1}(B) = f^{-1}(A \cap B).$$

Assurdo perché X è connesso.
2) Siano $p, q \in f(X)$ scegliamo $x \in f^{-1}(p), z \in f^{-1}(q)$ e $\beta : [0,1] \to X$ un cammino da x a z allora $f \circ \beta : [0,1] \to f(X)$ è un cammino da p a q $\square$

Corollario 1
Sia X spazio topologico. Se X è connesso per archi allora è connesso.

Dimostrazione
Suppongo per assurdo X sconnesso, esistono quindi disgiunti A, B non vuoti tali che $X = A \cup B$
Scegliamo $p \in A, q \in B$ e α cammino in X da p a q. $\alpha : [0,1] \to X$
Per il teorema precedente $\alpha([0,1])$ è connesso di X (e $[0,1]$ è connesso)
Osserviamo A è contemporaneamente aperto e chiuso, segue $\alpha([0,1]) \subseteq A$ assurdo perché $\alpha(1) = q \in B$ oppure $\alpha([0,1]) \cap A = \emptyset$ assurdo perché $\alpha(0) = p$ $\square$

Proposizione 1
Sia $I \subseteq \mathbb{R}$
Sono equivalenti

1. I *è un intervallo*
2. I *è connesso per archi*
3. I *è connesso*

Nota
In $\mathbb{R}$ definiamo un intervallo se $\forall a, b \in I \ a < b$ e $\forall c \in \mathbb{R}$ tale che $a < c < b$ abbiamo $c \in I$
Dimostrazione
1) $\Rightarrow$ 2) *Se* I *è intervallo allora è convesso, allora è connesso per archi*
2) $\Rightarrow$ 3)
Segue dal corollario precedente.
3) $\Rightarrow$ 1)
Supponiamo per assurdo che $I \subseteq \mathbb{R}$ *sia connesso ma non intervallo*
Allora $\exists a, b \in I, c \in \mathbb{R}$ *con* $a < c < b, \quad c \notin I$
Definisco $A := I \cap]-\infty, c[$ *e* $B := I \cap]c, +\infty[$
aperti in I *disgiunti non vuoti e* $I = A \cup B$*, assurdo.* $\square$
Osservazione
La connessione e la connessione per archi si usano per dimostrare che spazi topologici <u>non</u> sono omeomorfi.
Ad esempio $[0, 1[$ e $]0, 1[$ non sono omeomorfi (fogli di esercizi)

Lemma 3
Sia $f : S^n \to \mathbb{R}$ *continua,* $n \geq 1$
Allora esiste $p_0 \in S^n$ *tale che* $f(p_0) = f(-p_0)$

Dimostrazione
Consideriamo
g:$S^n \to \mathbb{R}$
$p \to f(p) - f(-p)$
è continua e vale $g(-p) = -g(p)$ *l'immagine di* g *è connessa ed è sottoinsieme simmetrico di* $\mathbb{R}$*. Allora l'immagine di* g *contiene* $0 \in \mathbb{R}$ $\square$

Lezione 09

Federico De Sisti

2025-03-24

0.1 Esonero

L'esonero sarà (forse) 15 aprile ore $18:00 - 20:00$ (da confermare)

0.2 Lezione

Ricordo: abbiamo visto che per $n \geq 1$, ogni funzione $f : S^n \to \mathbb{R}$ continua ammette $x_0 \in S^n$ t.c. $f(x_0) = f(-x_0)$

Corollario 1 (Invarianza del dominio con $n = 1$, m qualsiasi)
Siano $A \subseteq \mathbb{R}^m$ aperto non vuoto, $B \subseteq \mathbb{R}$ aperto non vuoto. Se $m \geq 2$ allora A e B non sono omeomorfi.

Dimostrazione
Sia $a \in A$, sia $\varepsilon > 0$ tale che $B_\varepsilon(a) \subseteq A$ considero $S = \{p \in \mathbb{R}^n \mid ||p-a|| = \varepsilon/2\}$
Allora $S \subseteq A$ supponiamo per assurdo che esista $g : A \to B$ omeomorfismo, allora la restrizione $g|_S : S \to \mathbb{R}$
questa è un'applicazione iniettiva e continua ed S è omeomorfa a S^{m-1}, assurdo

□

Proposizione 1
Sia X spazio topologico sia $Y \subseteq X$ sottospazio connesso.
Sia $W \subseteq X$ tale che $Y \subseteq W \subseteq \bar{Y}$($=$ chiusura di Y in X)
Allora W è connesso.
In particolare $\bar{Y}$ è connessa.

Dimostrazione
Per assurdo sia $W = A \cup B$ con A, B disgiunti, non vuoti, aperti in W
Segue $A \cap Y, B \cap Y$ sono disgiunti, e sono aperti in Y.
Infatti A è intersezione $A = W \cap A'$ con $A' \subseteq X$ aperto in X, e $B = W \cap B'$ con B' aperto.
Allora $A \cap Y = (A' \cap W) \cap Y = A' \cap Y$
$B \cap Y = (B' \cap W) \cap Y = B' \cap Y$
Visto che Y è connesso, $A \cap Y$ oppure $B \cap Y$ è vuoto. Senza perdita di generalità ne fisso uno.
Supponiamo $A \cap Y = \emptyset$ (se è $B \cap Y = \emptyset$ scambio i nomi)
Sia $a \in A$, sappiamo che $a \in \bar{Y}$, cioè a è adiacente a Y, quindi ogni intorno di a interseca Y, Ad esempio A'. è intorno aperto di a quindi $A' \cap Y \neq \emptyset$
Contraddice $A' \cap Y = A \cap Y = \emptyset$. Assurdo

□

Esempio(Spazio topologico connesso ma non connesso per archi)
Pettine con la pulce

Sia $Y \subseteq \mathbb{R}^2$

$$Y = ([0,1] \times \{0\}) \cup (\{(\frac{1}{n}, t) \mid n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}.\ t \in [0,1]\} \text{ il pettine}$$

$$X = Y \cup \{(0,1)\} \text{ (la pulce).}$$

Y è connesso per archi (quindi è connesso)
Inoltre $(0,1)$ è aderente (per ogni raggio, c'è sempre un dente dentro la palla) a Y, cioè

$$Y \subseteq X \subseteq \overline{Y}.$$

Per a proposizione precedente X è connesso, Ma X non è connesso per archi (V foglio di esercizi). Un altro esempio è il grafico di $\sin(\frac{1}{x})$, la chiusura del grafico comprende anche il segmento $\{0\} \times [-1,1]$ e non è connessa per archi. **Nota** La connessione si usa spesso per verificare che due spazi non sono omeomorfi, se è connesso uno e l'altro no, non possono esserlo.

Proposizione 2
Sia $f : X \to Y$ applicazione continua fra spazi topologici, supponiamo

1. *f suriettiva*
2. *Y è connesso*
3. *$f^{-1}(y)$ connesso $\forall y \in Y$*
4. *f aperta oppure chiusa.*

Allora X è connesso.

Esempio:
$X = \{a,b\}, Y = \{c\}$

$$\text{f:}X \to Y$$
$$a \to c$$
$$b \to c$$

Altro esempio
$f : [0,1] \cup]2,3] \to [0,2]$
$c \to \begin{cases} x & \text{se } x \in [0,1] \\ x-1 & \text{se } x \in [2,3] \end{cases}$

Dimostrazione
Supponiamo per assurdo X sconnesso, $A \cup B = X$ con A, B aperti disgiunti, non vuoti.
Supponiamo f aperto: considero $f(A), f(B)$ che sono aperti in Y
Abbiamo $f(A) \cup f(B) = f(A \cup B) = f(X) = Y$
e $f(A) \neq \emptyset \neq f(B)$, cisto che Y è connesso abbiamo

$f(A) \cap f(B) \neq \emptyset$
Sia $y \in f(A) \cap f(B)$, considero $f^{-1}(y)$ è connesso, l'insieme A è aperto e chiuso, interseca $f^{-1}(y)$ (poiché $y \in f(A)$) ma $f^{-1}(y) \nsubseteq A$ (perché $y \in f(B)$) assurdo
Il ragionamento con f chiusa è analogo. □

Teorema 1
Il prodotto di spazi topologici qualsiasi connessi, è connesso.
Analogamente il prodotto di spazi topologici connessi per archi è connesso per archi.

Dimostrazione
Siano P, Q spazi topologici connessi, considero $p : P \times Q \to P$

1. *p è continua e suriettiva*
2. *P è connesso*
3. *$\forall x \in P : p^{-1}(x) = \{x\}Q$ è omeomorfo a Q (quindi connesso)*
4. *p è aperta*

Per la proposizione precedente il dominio $P \times Q$ è connesso. □

Definizione 1
Sia X spazio topologico. Se un sottoinsieme $C \subseteq X$ è connesso e massimale rispetto a queste proprietà, allora C si dice componente connessa di X. Analogamente si definiscono le componenti connesse per archi.

Osservazione

1. Le componenti connesse sono sempre chiuse, perché la chiusura di un connesso è connesso.
   Attenzione, non sono sempre aperte ad esempio le componenti connesse di $\mathbb{Q}$ sono i singoli punti.
2. Due componenti connesse C_1, C_2 di X sono uguali e disgiunte (se due connessi si intersecano allora l'unione è connessa V esercizi settimanali)
   Lo stesso vale per le componenti connesse per archi.
3. Da 2. Segue che ogni spazio topologico è unione disgiunta delle sue componenti connesse e anche unione disgiunta delle sue componenti connesse per archi.

0.3 Spazi topologici compatti

Definizione 2
Sia X spazio topologico $R \subseteq 2^X$.

1. *R si dice ricoprimento se $\bigcup_{A \in R} A = X$*
   R ricoprimento si dice aperto se $A \in R$ aperto $\forall A \in R$
2. *Se $R \subseteq 2^X$ è un ricoprimento e $R' \subseteq R$ è anch'esso un ricoprimento, allora R' si dice sottoricoprimento.*

Definizione 3
Uno spazio topologico X si dice compatto se ogni ricoprimento ha almeno un sottoricoprimento finito.

Esempi:

1. Se X è finito (con qualsiasi topologia) allora è compatto.
2. Se X ha cardinalità qualsiasi ma topologia banale è compatto.
3. Se X è infinito con topologia discreta allora X non è compatto, basta considerare.
$$R = \{\{x\} \mid x \in X\}.$$

Teorema 2
L'intervallo $[0,1]$ è compatto

Dimostrazione
Sia R un ricoprimento aperto di $[0,1]$ (topologia di sottospazio indotta da $\mathbb{R}$ con topologia euclidea).
Per ogni $A \in R$ scegliamo $A' \subseteq \mathbb{R}$ aperto in $\mathbb{R}$ tale che $A = A' \cap [0,1]$ e consideriamo

$$S = \{A' \mid A \in R\} = \text{ famiglia di aperti in } \mathbb{R}.$$

l'unione contiene $[0,1]$.
Consideriamo $Y = \{t \in [0,1] \mid$ esiste una sottofamiglia finita di S la cui unione contiene $[0,t]\}$
Chiaramente $0 \in Y$, considero $b = supY$
Dimostriamo che $b \in Y$
Scegliamo $A_0 \in R$ tale che $b \in A_0$ scegliamo $\varepsilon > 0$ tale che $]b-\varepsilon, b+\varepsilon[\subseteq A_0$
Visto la definizione di b esiste $t \in Y$ tale che $b - \varepsilon < t \leq b$.
Sappiamo che esistono $A_1, \dots, A_n \in R$ tale che $A_1' \cup A_2' \cup \ldots \cup A_n' \supseteq [0,t]$, allora $a_0' \cup A_1' \cup \ldots \cup A_n' \supseteq [0,b]$.
Cioè $b \in Y$. dove tutti gli A_i' sono elementi di S
Dimostriamo che $b = 1$

Supponiamo per assurdo $b < 1$. Ripetiamo la costruzione precedente richiedendo anche $b + \varepsilon < 1$. Allora $b + \frac{\varepsilon}{2} \in Y$ perché

$$A_0' \cup A_1' \cup \ldots \cup A_n' \supset [0, b + \frac{\varepsilon}{2}].$$

Assurdo, quindi $b = 1$.
Da questo $1 \in Y$, cioè esiste una sottofamiglia finita si S la cui unione contiene $[0, 1]$, quindi R ammette un sottoricoprimento finito.

□

Osservazione:
Anche la compattezza si usa per dimostrare che due spazi topologici non sono omeomorfi, ad esempio: $\mathbb{R}$ e $[0, 1]$ non sono omeomorfi perché $[0, 1]$ è compatto e $\mathbb{R}$ no.

Proposizione 3
Sia X spazio topologico e Y sottospazio.

1. *Se X è compatto e Y è chiuso in X. Allora Y è compatto.*
2. *Se X è T2 e Y è compatto allora Y è chiuso in X.*

Esercizio:
Cercate dei controesempi alle ipotesi.
Trovare X, Y, con Y chiuso e non compatto e trovare X, Y con X con Y compatto ma non chiuso in X
Provare con controesempi facili! Magari spazi con 2 punti e Y un solo punto
Dimostrazione

1. *R ricoprimento aperto di Y.*
   Per ogni $A \in R$ scegliamo $A' \subseteq X$ aperto in X tale che $A' \cap Y = A$.
   Abbiamo $Y \subseteq \bigcup_{A \subset R} A'$ e vale
   $X = \left(\bigcup_{A \in R} A'\right) \cup (X \setminus Y)$
   Quindi $\{A' \mid A \in R\} \cup \{X \setminus Y\}$ è un aperto di X.
   Per compattezza di X esistono $A_1, \ldots, A_n \in R$ tale che

   $$X = A_1' \cup \ldots \cup A_n' \cup (X \setminus Y).$$

   Allora $A_1' \cup \ldots \cup A_n' \supseteq Y$ e quindi $A_1 \cup \ldots \cup A_n = Y$
   Segue Y compatto.

2. *Supponiamo X T2, Y compatto, dimostrare che Y è chiuso in X*
   Dimostriamo che XY è aperto.
   Dimostriamo che è intorno di ciascun suo punto.
   Scegliamo $q \in X \setminus Y$
   consideriamo un qualsiasi $p \in Y$ e applichiamo T2. Esistono intorni aperti $U \ni p, V \ni Q$ tale che $U \cap V = \emptyset$

faccio variare p in Y e consideriamo tutte le coppie di aperti $\overline{U}, V$
Usiamo però i nomi (per non fare errori) dato che dipendono da entrambi i punti

$$U_{p,q} \ni p, \quad V_{p,q} \ni q.$$

Tuttavia il nostro q è fissato, quindi possiamo chiamarli semplicemente

$$U_p \ni p, \; V_p \ni q.$$

Allora $\{U_p \mid p \in Y\}$ è una famiglia di aperti di X la unione contiene Y. Dalla compattezza di Y segue che esiste una sottofamiglia finita la cui unione contiene Y.

$$U_{p_1} \cup \ldots \cup U_{p_n} \supseteq Y.$$

Allora

$$V = V_{p_1} \cap \ldots \cap V_{p_n}.$$

è intorno aperto di q tutto contenuto in $X \setminus Y$

□

Lezione 10 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-03-25

0.1 Altre informazioni sui compatti

Ricorda:
Un chiuso in un compatto è compatto, un compatto in un $T2$ è chiuso

Corollario 1
Sia $\mathbb{R}$ con topologia euclidea, $Y \subseteq \mathbb{R}$ sottospazio allora Y compatto $\Leftrightarrow Y$ chiuso e limitato.

Dimostrazione
$\Rightarrow \mathbb{R}$ *è* $T2$ *, se* Y *è compatto allora* Y *è chiuso in* $\mathbb{R}$*. Inoltre* Y *è limitato perchè il ricoprimento* $R = \{Y \cap]-n, n[\mid n \in \mathbb{Z}\}$ *ha sottoricoprimenti finiti.*
$\Leftarrow$ *Suppongo* Y *chiuso e limitato, quindi in* $n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ *tale che* $Y \subseteq [-n, n]$*.*
L'intervallo $[-n, n]$ *è omeomorfo a* $[0, 1]$ *quindi è compatto.*
Inoltre Y *è chiuso in* $[-n, n]$ *quindi è compatto* $\square$

Teorema 1
Sia $f : X \to Y$ applicazione continua fra spazi topologici, se X è compatto allora $f(X)$ è compatto.

Dimostrazione
Considero la restrizione

$$\tilde{f} : X \to f(X).$$

è continua. $\mathbb{R}$ *ricoprimento aperto di* $f(X)$*, allora*

$$\tilde{R} = \{f^{-1}(A) \mid A \in R\}.$$

è un ricoprimento aperto di X*, quindi esiste un sottoricoprimento finito*

$$\{f^{-1}(A_1), \ldots, f^{-1}(A_n)\}.$$

Abbiamo, $f(f^{-1}(A)) = A \cap f(X) = A$
Quindi $\{A_1, \ldots, A_n\}$ *è sottoricoprimento finito di* R $\square$

Corollario 2
Siano X spazio topologico e $f : X \to \mathbb{R}$ continua, se X è compatto e diverso dal vuoto allora f ammette massimo e minimo.

Dimostrazione
$f(x)(\subseteq \mathbb{R})$ *è compatto,* $f(x) \neq 0$ *e limitato, quindi* $\sup f(x) \in \mathbb{R} \ni \inf f(x)$.
$f(X)$ *è anche chiuso, quindi* $\sup f(x) = \max f(x)$ *e* $\inf f(x) = \min f(x)$ $\square$

0.2 Come trovare omeomorfismi

Trovare esplicitamente un omeomorfismo è a volte molto rogonoso, di seguito troviamo degli strumenti per facilitare il lavoro.

Corollario 3
Sia $f : X \to Y$ applicazione continua fra spazi topologici. Se X è compatto e Y è $T2$ allora f è chiusa

Dimostrazione
Y è $T2$, quindi $f(C)$ è chiuso in Y. □
Otteniamo ora un fatto utilissimo.

Corollario 4
Sia $f : X \to Y$ applicazione continua fra spazi topologici. Se X è compatto, Y è $T2$, e f è biettiva, allora f è omeomorfismo

Dimostrazione
Dal corollario precedente, f è chiusa. Allora è un continua, biettiva, chiusa, segue: omeomorfismo. □

Proposizione 1
Sia $f : X \to Y$ applicazione continua fra spazi topologici.
Supponiamo

1. *f suriettiva.*
2. *Y compatto.*
3. *$f^{-1}(y)$ compatto $\forall y \in Y$.*
4. *f chiusa.*

Allora X è compatto.

Osservazione
La condizione analoga (4.) f aperta, non è sufficiente a garantire la compattezza di X. (fogli di esercizi per controesempio)
Dimostrazione
Definiamo AX aperto, un insieme $A' \subseteq Y$:

$$A' = \{y \in Y \mid f^{-1}(y) \subseteq A\}.$$

Osservazione
A' potrebbe essere vuoto. Però A' è aperto in Y, verifichiamo che $Y \setminus A'$ è chiuso in Y :

$$Y \setminus A' = \{z \in Y \mid f^{-1}(z) \nsubseteq A\} = \{z \in Y \mid \exists b \in X \setminus A \mid f(b) = z\} = f(X \setminus A)..$$

Allora $Y \setminus A'$ è chiuso perché immagine di XA tramite f chiusa.
Sia R ricoprimento aperto di X.
Sia $y \in Y$, considero $f^{-1}(y)$ è compatto. Allora esistono $A_1, \dots, A_n \in R$ tale che $f^{-1}(y) \subseteq A_1 \cup \dots \cup A_n$, ogni A_i dipende da y.
Definiamo $B_y = A_1 \cup \dots \cup A_n$ (B_y dipende da y, definito come A') aperto in X
Considero B'_y è non vuoto e contiene $y \in Y$
Segue:

$$\{B'_y \mid y \in Y\} \text{ è un ricoprimento aperto di } X.$$

Per compattezza possiamo estrarre un sottoricoprimento finito $B_{1y_1}, \dots, B'_{y_n}$
Segue $\{B_{y_1}, \dots, B_{y_n}\}$ è ricoprimento finito aperto di X, Ciascun B_y è unione di un numero finito di elementi di R, quindi è un ammette un sottoricoprimento finito. □

Proposizione 2
Siano P, Q spazi topologici. Se P è compatto allora la proiezioni $P \times Q \to Q$ è chiusa.

Osservazione:
La proposizione in realtà è un'equivalenza: P è compatto $\Leftrightarrow p : P \times Q \to Q$ è chiusa $\forall Q$ spazio topologico.

Dimostrazione
Sia $C \subseteq P \times Q$ chiuso in topologia prodotto.
Allora $(P \times Q) \setminus C$ è aperto, vogliamo dimostrare che $Q \setminus q(C)$ è aperto, cioè che $Q \setminus q(C)$ è intorno di ogni suo punto $y \in Qq(C)$
$P \times \{y\} (\subseteq P \times Q)$
è omeomorfo a P, quindi compatto.
Consideriamo la solita base della topologia prodotto
$(P \times Q) \setminus C = \bigcup_{i \in I} U_i \times V_i$
Per compattezza $P \times \{y\}$ è contenuto nell'unione.
$P \times \{y\} \subseteq (U_{i_1} \times V_{i_1}) \cup \dots \cup (U_{i_n} \times V_{i_n}) \subseteq (P \times Q) \setminus C$
Considero $V = V_{i_1} \cap \dots \cap V_{i_n}$

$$P \times \{y\} \subseteq (U_{i_1} \times V) \cup \dots \cup (U_{i_n} \times V) \subseteq (P \times Q) \setminus C.$$

Allora poniamo $U = U_{i_1} \cup \dots \cup U_{i_n}$

$$P \times \{y\} \subseteq U \times V \subseteq (P \times Q) \setminus C.$$

Segue: nessun punto di V è la seconda coordinata di alcun punto di C cioè $y \in V \subseteq Q \setminus q(C)$
Segue $q(C)$ è chiuso. □

Osservazione
La dimostrazione assomiglia a quella su $T2 \Leftrightarrow \triangle$ chiusa nel prodotto (vedi teorema di Wallace sul Manetti).

Corollario 5
Se P e Q sono spazi topologici compatti allora $P \times Q$ compatto.

Dimostrazione
Applichiamo a $q : P \times Q \to Q$ la proposizione che da condizioni sufficienti alla compattezza del dominio.
Abbiamo q continua, suriettiva, codominio Q compatto, controimmagini $P \times \{y\}$ compatte, q chiusa, per la proposizione precedente, Segue $P \times Q$ compatto $\square$
Esempio
$[0, 1] \times [0, 1] = [0, 1]^2$ è compatto, e in generale $[0, 1]^n \quad \forall n \geq 1$ è compatto.
Osservazione
A questo punto si dimostra facilmente $Y \subseteq \mathbb{R}^n$ è compatto $\Leftrightarrow$ Y è chiuso e limitato.

0.3 Identificazioni

Definizione 1
Un'applicazione $f : X \to Y$ fra spazi topologici si dice identificazione se

1. *f è continua e suriettiva*
2. *Un sottoinsieme $A \subseteq Y$ qualsiasi è aperto se e solo se $f^{-1}(A)$ è aperto in X*

Osservazione
Se f è un'identificazione allora la topologia su Y è determinata da f e dalla topologia su X.

Lemma 1
Sia $f : X \to Y$ applicazione continua fra spazi topologici.

1. *Se f è suriettiva e aperta allora è un'identificazione.*
2. *Se f è suriettiva e chiusa allora è un'identificazione.*

Dimostrazione
1) *Supponiamo f suriettiva, aperta e continua.*
Sia $A \subseteq Y$ supponiamo $f^{-1}(A)$ aperto in X. Dimostriamo che A è aperto in Y.
Considero $f(f^{-1}) = A \cap f(X) = A \cap Y = A$ aperto perché f è aperta
Il punto 2 della dimostrazione è lasciata per esercizio ma è del tutto analoga.
$\square$
Esempi

1. Ogni omomorfismo è identificazione.
2. Le proiezioni $p : P \times Q \to P$ e $q : P \times Q \to Q$ sono identificazioni.

3. $$\begin{aligned} f : [0,1] \to & \quad S^1 \\ t \to & (\cos(2\pi t), \sin(2\pi t)) \end{aligned}$$
   è suriettiva e continua.
   è anche chiusa perché $[0,1]$ è compatto e S^1 è $T2$.

Lezione 11 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-03-31

0.1 Altro sulle identificazioni

Lemma 1 (proprietà universale delle identificaizone)
SCHEMA 3:18
Sia $f : X \to Y$ identificazione fra spazi topologici, sia Z spazio topologico e $g : X \to Z$ continua. Supponiamo che g sia costante sulle fibre di f (fibra di f = controimmagine $f^{-1}(y)$ per $y \in Y$). Allora $\exists! h : Y \to Z$ continua t.c. il diagramma commuta cioè $g = h \circ f$

Dimostrazione
Per ogni $y \in Y$ scegliamo $x \in X$ tale che $f(x) = y$ ponendo $h(y) = g(x)$ questo definisce

$$h : Y \to Z.$$

È ben definita perché g è costante sulla fibra di f, infatti se $x \in X$ soddisfa $f(x') = y$ allora $x, x' \in f^{-1}(y)$ e $g(x) = g(x') = h(y)$.
Chiara,ente questa h è unica tale che $g = h \circ f$
Verifichiamo che h è continua, sia $A \subseteq Z$ aperto. Abbiamo $g^{-1}(A) \subseteq X$ è aperto, Inoltre $g^{-1}(A) = f^{-1}(h^{-1}(A))$
Quindi $h^{-1}(A)$ è un sottoinsieme di Y la controimmagine in X è aperta. Visto che f è identificazione, $h^{-1}(A)$ è aperta. □

Osservazione
Sia $f : X \to Y$ identificazione.
Sia $A \subseteq X$ aperto saturo, cioè $\forall a \in A \ \ \forall b \in X$. se $f(a) = f(b)$ allora $b \in A$.
Allora vale $f^{-1}(f(A))$ = insieme dei punti di X che vanno in punti di Y dove vanno anche punti di A
Allora $f(A)$ è aperto in Y perché la sua controimmagine è A
Cioè f è aperta sugli aperti saturi.

0.2 Topologia quoziente

Definizione 1 (Topologia quoziente)
Siano X spazio topologico, Y insieme, $f : X \to Y$ applicazione suriettiva. La famiglia

$$\{A \subseteq Y \mid f^{-1}(A) \text{ è aperto di } X\}.$$

questa è una topologia su Y ed è detta topologia quoziente (indotta da f)

Esercizio
Verificare che sia una topologia
Osservazione
Se su Y metto la topologia quoziente allora f è un'identificazione. Inoltre è l'unica topologia su Y che rende f un'identificazione.
Esempi

1. Sia X spazio topologico, sia $\sim$ una relazione d'equivalenza su X e consideriamo $X/\sim = \{$ classi di equivalenza $[x]$ con $x \in X\}$

e l'applicazione

$$\begin{array}{c} \pi : X- > X/\sim \\ \text{x} \to [x] \end{array}.$$

Si mette su $X/\sim$ la topologia indotta da π

2. Considero $X = [0,1]$ definisco

$$x \sim y \Leftrightarrow \begin{cases} x = y \quad \text{oppure} \\ x, y \in \{0,1\} \end{cases}.$$

Le classi di equivalenza sono

$$[0] = [1], [z] \quad \forall z \in]0,1[.$$

Mettiamo su $X/\sim$ la topologia quoziente
Ad esempio $X = [0, \frac{1}{2}[\subseteq X$ è aperto in X. L'immagine $\pi(C)$ è

$$\pi(C) = \{[0] = [1]\} \cup \{[z] \mid z \in]0, \frac{1}{2}[\}.$$

è aperto in $X/\sim$?
La sua controimmagine è $\pi^{-1}(\pi(C))$ = punti di X equivalenti a qualche punto di $C = [0, \frac{1}{2}[\cup \{1\}$ non è aperto in $[0,1]$ Ad esempio invece

$$\pi([0, \frac{1}{2}[\cup]\frac{3}{4}, 1]).$$

è un aperto in $X/\sim$. Vediamo che $X/\sim$ è omeomorfo a S^1.

Ricorda: $X = [0,1]$, $x \sim y \Leftrightarrow \begin{cases} x = y \quad \textit{opp.} \\ x, y \in \{0,1\} \end{cases}$
Verifica che $X/\sim$ è omeomorfo a S^1 (importante!)
Abbiamo le applicazioni:
AGGIUNGI GRAFICO 4:25
$g(t) = (\cos(2\pi t), \sin(2\pi t))$ è continua, ed è costante sulle fibre di π
Fibre di π : $\{z\} = [z] = \pi^{-1}([z]) \quad \forall z \in]0,1[$
$\pi^{-1}([0] = [1]) = [0] = [1] = \{0,1\}$
Infatti $g(0) = g(1)$
Per la proprietà universale delle identificazioni esiste $h : X/\sim \to S^1$ tale che $g(\pi(t)) = f(h([z])) = g(t)$
Inoltre h è suriettiva perché lo è g
Si verifica facilmente che h è iniettiva perché g non 'e iniettiva, solo perchè $g(0) = g(1)$
Inoltre S^1 è T2 (poiché è in $\mathbb{R}^2$) e $X/\sim$ è compatto poiché $X/sim = \pi(X)$ e X è compatto
Terzo esempio

$X = \mathbb{R}$ definisco $x \sim y \Leftrightarrow x - y \in \mathbb{Z}$
Possiamo immaginare questo quoziente come una spirale guardata dall'alto (la retta $\mathbb{R}$ proiettata sul piano x, y dove quelli sulla stessa fibra sono quelli a distanza 1,l'un l'altro)
Verifichiamo che $X/\sim$ è omeomorfo a S^1. Come prima abbiamo
Inserisci immagine 4:40
Prendo $g(t) = (\cos(2\pi t), \sin(2\pi t))$ come prima abbiamo l'applicazione
$h([t] = g(t)$ è ben definita $(g(t+n) = g(t) \quad \forall t \in \mathbb{R}, \quad \forall n \in \mathbb{Z})$ è continua. Anche qui h è biettiva. Vorrei che $X/\sim$ compatto, ma X non è compatto.
Osservo che $\pi(X) = X/\sim = \pi([0,1])$ poiché ogni classe di equivalenza ha rappresentante in $[0,1]$
Quindi h è omeomorfismo
Esempio 4
In $\mathbb{R}^2$ consideriamo $X = \mathbb{R} \times \{0,1\}$
definiamo

$$(x,y) \sim (x',y') \Leftrightarrow \begin{cases} (x,y) = (x',y') & \textit{oppure} \\ x = x' \neq 0 \end{cases} .$$

È una relazione di equivalenza per cui
$(x,0) \sim (x,1)$ se $x \neq 0$
$(0,0) \not\sim (0,1)$
$X/\sim$ è uno specie di $\mathbb{R}$ con l'origine "raddoppiata"
$X/\sim$ non è T2
Esempio di intorno aperto di $[(0,0)]$
$\pi(]-1.1[\times\{0\} \cup]-1,0[\cup]0,1[) \times \{1\}$ aperto saturo di X
Esempio 5
Dato X spazio topologico e $Y \subseteq X$ sottoinsieme, spesso si considera $\sim_Y$ su X:

$$a \sim b \Leftrightarrow \begin{cases} a = b & \textit{opp.} \\ a, b \in Y \end{cases} .$$

Lo spazio topologico $X/\sim$ è in X
dove ho contratto i sottoinsieme Y ad un singolo punto.
L'esempio 2 è ottenuto in questo modo prendendo $Y = \{0,1\}$
Esempio
$X = \mathbb{R}^2$ definiamo $Y = \{p \in \mathbb{R}^2 \mid ||p||^2 \leq 1\}$ e considero $X/\sim_Y$
È omeomorfo a S^2. Possiamo anche prendere $Z = \{p \in \mathbb{R}^2 \mid ||p|| > 1\}$
$X/\sim_Z$ è più strano!

Definizione 2
Sia X spazio topologico, considero $Omeo(X) = \{f : X \to X \mid f \text{ è omeomorfismo}\}$ è un gruppo con operazione $f \circ g$ ed è elemento neutro Id_X.
Sia $G \subseteq Omeo(X)$ un sottogruppo.
Si definisce $x \sim y \Leftrightarrow \exists g \in G \mid g(x) = g\}$ (è relazione d'equivalenza (ad esempio se $x \sim y$ e $y \sim z$ allora $\exists g \in G \mid g(x) = y$ $\exists h \in G \mid h_(y) = z$ allora $z = h(y) = h(g(x)) = (h \circ g)(x)$ da cui $x \sim z$)

Si definisce lo spazio topologico

$$X/G = X/\sim.$$

(Le classi di equivalenza sono le orbite di G su X)

Esempio
$X = \mathbb{R}$, poniamo

$$\begin{aligned} f_n :&\mathbb{R} \to \mathbb{R} \\ &x \to x+n \end{aligned}.$$

$$G = \{f_n \mid n \in \mathbb{Z}\}.$$

è sottogruppo di $Omeo(X)$ infatti $Id_X = f_0$
$f_n \circ f_m = f_{n+m}$
la relazione è la stessa di prima

$$x \sim y \Leftrightarrow x - y \in \mathbb{Z}.$$

Proposizione 1
Sia X spazio topologico sia $G \subseteq Omeo(X)$ sottogruppo.
Allora

$$\begin{aligned} \pi :&X \to X/G \\ x \to &[x] \end{aligned}.$$

è aperta.
Inoltre se G è finito allora π è anche chiusa.

Dimostrazione
Sia $A \subseteq X$ aperto, dimostriamo che $\pi(A)$ è aperto in X/G
Considero $\pi^{-1}(\pi(A)) = \{x \in X \mid \pi(x) \in \pi(A)\}$
$= \{x \in X \mid \exists a \in A \mid \pi(a) = \pi(x)\}$
$= \{x \in X \mid \exists g \in G \mid g(x) \in A\}$
$\bigcup\limits_{h \in G} h(A)$ *con* $h = g^{-1}$
Quindi $\pi^{-1}(\pi(A))$ è unione di aperti, quindi è aperto in X, quindi $\pi(A)$ è aperto in X/G
La dimostrazione con G finito è analoga prendendo $A \subseteq X$ chiuso. $\square$

Teorema 1
Siano X spazio topologico e $G \subseteq Omeo(X)$ sottogruppo. Suppongo X T2, allora X/G è T2 $\Leftrightarrow D = \{(x, g(x)) \in X \times X \mid x \in X \ g \in G\}$ è chiuso in $X \times X$

Osservazione
In generale data una relazione d'equivalenza $X/\sim$ T2 non è equivalente a $\{(x,y)\ |x \sim y\}$ chiuso in $X \times X$
Osservazione
Siano $f : X \to Y,\ g : Z \to W$
applicazione aperta fra spazi topologici. Allora

$$\begin{aligned} f \times g :& X \times Z \to Y \times W \\ & (x,z) \to (f(x), g(x)) \end{aligned}.$$

è aperta. Ma attenzione: se f, g sono identificazioni, non è detto che lo sia $f \times g$ (V foglio di esercizi)
Dimostrazione
Considero

$$\pi \times \pi : X \times X \to X/G \times X/G.$$

Ricordo $\pi : X \to X/G$ *è aperta e suriettiva.*
quindi $\pi \times \pi$ *è aperta e suriettiva,*
quindi $\pi \times \pi$ *è un'identificazione.*
Abbiamo

$$D = (\pi \times \pi)^{-1}(\Delta_{X/G}).$$

dove $\Delta_{X/G} \subseteq X/G \times X/G$ *è la diagonale.*
Infatti $(x,y) \in X \times X$ *soddisfa* $\pi(x) = \pi(y) \Leftrightarrow [x] = [y] \Leftrightarrow ([x],[y]) \in \Delta_{X/G}$
Quindi X/G *è T2* $\Leftrightarrow \Delta$ *è chiuso in* $X \times X$
In un'identificazione qualsiasi, un sottoinsieme del codominio è chiuso se e solo se la diagonale è chiusa.finisci lezione

$\square$

Lezione 12 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-04-01

0.1 Nuovo sito del prof

Sito del corso www.sites.google.com/uniroma1.it/guidopezzini/

0.2 Gruppi topologici

Definizione 1
Un gruppo topologico è un gruppo G che è anche uno spazio topologico tale che l'operazione di gruppo

$$\begin{aligned} G \times G &\to G \\ (g,h) &\to g \cdot h \end{aligned}.$$

e l'inverso

$$\begin{aligned} G &\to G \\ g &\to g^{-1} \end{aligned}.$$

sono applicazioni continue

Esempi

1. Se G è un gruppo qualsiasi diventa un gruppo topologico con topologia banale o discreta.
2. $(\mathbb{R}^n, +)$ $\mathbb{R}^n$ con topologia euclidea è un gruppo topologico.
3. $GL(n,\mathbb{R}), GL(n,\mathbb{C})$ con prodotto di matrici
   Identifichiamo
   $Mat_n(\mathbb{R})$ con $\mathbb{R}^{n^2}$ e $Mat_N(\mathbb{C})$ con $\mathbb{R}^{2n^2}$
   mettiamo su $GL(n)$ la topologia di sottospazio. Allora $GL(n,\mathbb{R})$ e $Gl(n,\mathbb{C})$ sono gruppi topologici
4. Anche sottogruppi noti quali $Sl(n), So(n), U(n), \ldots$
   sono gruppi topologici.

Esercizio(difficile)
Sia G un gruppo topologico $T2$, Sia $H \subseteq G$ un sottogruppo chiuso. Consideriamo

$$G/H = \{\text{classi laterali } gH \text{ con } g \in G\}.$$

Ricordo: $G/H = G/\sim$
dove $g_1 \sim g_2 \Leftrightarrow g_1H = g_2H$
Dimostrare che G/H è $T2$ (con la topologia quoziente)

0.3 Proprietà di numerabilità

Definizione 2
Sia X spazio topologico

1. *X si dice 1^o-numerabile se ogni punto ha un sistema fondamentale di intorni numerabili*
2. *X si dice 2^o-numerabile se la sua topologia ha una base numerabile.*
3. *X si dice separabile se X ha un sottoinsieme denso e numerabile.*

Esempi

1. $\mathbb{R}^n \ni p$, sistema fondamentale di intorni e $\{B_{\frac{1}{n}}(p) \mid n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}\}$
   quindi $\mathbb{R}^n$ è 1^o-numerabile
   Base numerabile
   $$\{B_{\frac{1}{n}}(q) \mid n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}, q \in \mathbb{Q}^n\}.$$
   quindi $\mathbb{R}^n$ è 2-numerabile. Inoltre $\mathbb{Q}^n$ è denso in $\mathbb{R}^n$ ed è numerabile quindi $\mathbb{R}^n$ è separabile.
2. Ogni spazio topologico finito è 1^o-numerabile, 2^o-numerabile, separabile.
3. Ogni spazio topologico numerabile è separabile
4. Sia X spazio topologico discreto, di qualsiasi cardinalità: è 1^o-numerabile, Per ogni $x \in X$
   $\{x\}$ è intorno di x, $\{\{x\}\}$ è un sistema fondamentale di intorni.

Lemma 1
Ogni spazio topologico 2^o-numerabile è 1^o numerabile

Dimostrazione
*Sia B base numerabile, Sia $x \in X$ e consideriamo $J = \{C \in B \mid C \ni x\}$.
Allora J è sistema fondamentale di intorni. Infatti sia U intorno di x,
sia $A \subseteq X$ aperto tale che $x \in A \subseteq U$ scriviamo $A \bigcup_{i\in I} B_i$
con $B_i \in B$. Esiste $i_0 \in I \mid B_{i_0} \ni x$ allora $B_{i_0} \in J$ e $B_{i_0} \subseteq U$. Segue J è sistema fondamentale di intorni* $\square$

Proposizione 1
Ogni spazio metrico:

1. *è 1^o-numerabile*
2. *se è separabile allora è 2^o-numerabile*

Dimostrazione
Procediamo per ogni punto

1. *Sia* $p \in X$ $(X$ *spazio metrico*$)$
   allora $\{B_{\frac{1}{n}}(p) \mid n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}\}$ *è sistema fondamentale d'intorni*
2. *Sia* E *sottoinsieme denso numerabile di* X,

$$B = \{B_{\frac{1}{n}}(e) \mid e \in E \quad n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}\}.$$

Verifichiamo che è una base. Sia $A \subseteq X$ *aperto.*
Dato $a \in A$
scegliamo $n(a) \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$ *tale che* $B_{\frac{2}{n(a)}}(a) \subseteq A$
Consideriamo $B_{\frac{1}{n(a)}}(a)$ *e un punto* $e \in E$ *tale che*

$$e \in B\frac{1}{n(a)}(a) \ .$$

ricordiamo: $B_{\frac{2}{n(a)}}(a) \subseteq A$. *Allora*
$B_{\frac{1}{n(a)}}(e) \ni a$
Segue $a \in B_{\frac{1}{n(a)}}(e) \subseteq B_{\frac{2}{n(a)}}(a) \subseteq A$ *per la disuguaglianza triangolare.*
Chiamiamo $e = e(a)$ *Abbiamo*

$$A = \bigcup_{a \in A} B_{\frac{1}{n(a)}}(e(a)).$$

Segue B *è base.*

□

Lemma 2
Ogni spazio topologico 2^o*-numerabile è separabile.*

Dimostrazione
Sia B *base numerabile,* $B = \{A_1, A_2, \ldots\}$
basta scegliere $e_i \in A_i \quad \forall i$ *e porre* $E = \{e_1, e_2, \ldots\}$ □
Esempio:
Non è vero che ogni spazio topologico 1^o-numerabile è separabile e 2^o-numerabile.
Ad esempio con topologia di Sorgenfey
Una base è $B = \{[a, b[\mid a < b\}$
Quindi $\mathbb{Q}$ è denso in $\mathbb{R}$ anche con questa topologia, quindi $\mathbb{R}$ è separabile.
Per ogni $a \in \mathbb{R}$ la famiglia $\{[a, a + \frac{1}{n}[\mid n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}\}$
è un sistema di intorni di a. Ma $\mathbb{R}$ con questa topologia non è 2^o-numerabile.
Veridica per esercizio (suggerimento, considero $[x, x+1[\ \ \forall x \in \mathbb{R}$ e usare il fatto che x è il minimo di qualsiasi sottoinsieme A tale che $x \in A \subseteq [x, x+1[$)
Segue anche che questo spazio topologico non è metrizzabile (ma è T2)

0.4 Successioni

Definizione 3
Sia X spazio topologico.
Una successione in X è un'applicazionea

$$
\begin{aligned}
a : & \mathbb{Z}_{\geq 1} \to X \\
& n \to a_n
\end{aligned}
$$

Si dice che a converge a $p \in X$ se $\forall U$ intorno di p $\exists N \in \mathbb{Z}_{\geq 1} \mid a(n) \in U \quad n \geq N$

Osservazione:
Se X ha topologia banale ogni successione converge a ogni $p \in X$
Se X è $T2$ allora i limiti delle successioni sono unici se a (succ.) converge a p e q allora $p = q$

Proposizione 2
Sia X spazio topologico 1^o-numerabile, Siano $A \subseteq X, p \in X$ sono equivalenti:

1. *esiste una successione in A che converge a p*
2. $p \in \overline{A}$

Dimostrazione
1) $\Rightarrow$ 2)
Se vale 1) ogni intorno di p interseca A quindi $p \in \overline{A}$
2) $\Rightarrow$ 1)
Supponiamo $p \in \overline{A}$.
Sia $\{U_n\}$ sistema fondamentale di intorni numerabile.
Considero $\forall n \geq 1$ $U_1 \cap \ldots \cap U_n$
è intorno di p, scelgo $a(n) \in A \cap U_1 \cap \ldots \cap U_n$
Allora la successione

$$
\begin{aligned}
a : & \mathbb{Z}_{\geq 1} A \to A \\
& n \to a(n)
\end{aligned}.
$$

converge a p. Verifica sia U intorno di p sia N tale che $U_n \subseteq U$
per ogni $n \geq N$ abbiamo

$$a(n) \in U_1 \cap \ldots \cap U_n \cap \ldots \cap U_n.$$

quindi $a(n) \in U$ e la successione converge a p. $\square$

Definizione 4 (Sottosuccessioni)

1. *Una sottosucceisone di una successione* $a : \mathbb{Z}_{\geq 1} \to X$
   è una successione del tipo
   $$b(n) = a(f(n)).$$
   dove $f : \mathbb{Z}_{\geq 1} \to \mathbb{Z}_{\geq 1}$
   è strettamente crescente.

2. *Uno spazio topologico è compatto per successioni se ogni successione ha sottosuccessioni convergenti.*

Osservazioni
La compattezza e la compattezza per successioni non sono equivalenti.
Esistono compatti per successioni ma non compatti. (esempio della linea lunga, long line)
Esistono spazi topologici compatti ma non compatti per successioni
(prodotti di infiniti spazi topologici).

Lezione 13 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-04-28

0.1 Successioni di Cauchy

Definizione 1 (Successione di Cauchy)
Sia X spazio metrico, a successione in X. a è di Cauchy se

$$\forall \varepsilon > 0 \;\; \exists \;\; N \mid d(a_m, a_n) < \varepsilon \;\; \forall n, m \geq N.$$

Osservzioni:

1. Se una successione è convergente allora è di Cauchy.
2. Se una successione di Cauchy a ha una sottosuccessione di Cauchy, allora a è convergente. (verifica per esercizio)

Definizione 2 (Spazio metrico completo)
Uno spazio metrico è completo se ogni successione di Cauchy è convergente.

Teorema 1
$\mathbb{R}^n$ è completo

Dimostrazione
Sia a successione di Cauchy in $\mathbb{R}^n$, scegliamo $N \in \mathbb{Z}$
tale che $d(a_n, a_m) < 1 \quad \forall n, m \geq N$
Sia $\{||a(1)||, ||a(2)||, \ldots, ||a(N)||\}$ e sia R il massimo di quest'insieme.
Allora $D = \overline{B_{R+1}(0)} = \{p \in \mathbb{R}^n \mid ||p|| \leq R + 1\}$
contiene $a(n) \;\; \forall n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$
Sappiamo che D è compatto, è anche spazio metrico $\Rightarrow$ è 1^o è primo numerabile, quindi D è compatto per successioni.
Segue: a ha una sottosuccessione convergente per l'osservazione 2), la successione converge. □

0.2 Compattezza in spazi metrici

Definizione 3
Uno spazio metrico X si dice totalmente limitato se $\forall r \in \mathbb{R}_{>0} \; \exists \; x_1, \ldots, x_n \in X$ tale che $X = \bigcup_{i=1}^{n} B_r(x_i)$ (n e i punti $x_1, \ldots, x_n$ possono dipendere da r)

Lemma 1
Ogni spazio metrico totalmente limitato è separabile. (quindi è anche 2^o-numerabile)

Dimostrazione
Dato $m \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$ *considero* $E_m \subseteq X$ *sottoinsieme finito tale che* X *è ricoperto da palle aperte di centro i punti di* E_n *e raggio* $\frac{1}{m}$.
Considero $E = \bigcup_{n=1}^{+\infty} E_n$
E *è numerabile ed è denso perchè ogni* $x \in X$ *è a distanza* $< \frac{1}{m}$ *da qualceh punto doi* E *e questo vale* $\forall m \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$ □

Teorema 2
Sia X *spazio metrico. Sono equivalenti:*

1. X *compatto*
2. X *compatto per successioni*
3. X *completo e totalmente limitato*

Dimostrazione
Dimostriamo ogni impliazione

$1) \Rightarrow 2)$ X *è* 1^o*-numerabile, quindi se è compatto allora è compatto per successioni*

$2) \Rightarrow 3)$ *Supponiamo* X *compatto per successioni, ogni successione di Cauchy ammette sottosuccessione convergente, quindi* X *è completo. Dimostriamo che* X *è totalmente limitato per assurdo, cioè* $\exists r > 0$ *tale che* X *non è unione di un numero finito di palle aperte di raggio* r.
Costruiamo una successione a *in* X:
$a(1) \in X$ *a piacere*
$a(2) \in X \setminus B_r(a(1)) \neq \emptyset$
$a(3) \in X \setminus (B_r(a(1)) \cup B_r(a(2)))$
$a(n) \in X \setminus \bigcup_{k=1}^{n-1} B_r(a(k)) \neq \emptyset$ *per ipotesi*
Abbiamo $d(a(n), a(m)) \geq r \quad \forall n, m$ *quindi* a *non è di Cauchy e non lo è nessuna sottosuccessione* $\Rightarrow$ *Allora nessuna sottosuccessione è convergente: assurdo.*

$3) \Rightarrow 1)$ X *completo e totalmente limitato. Per il lemma* X *è separabile e* 2^o*-numerabile*
Dimostriamo $2)$ *e seguirà anche* $1)$.
Sia a *successione in* X*, consideriamo per ogni* $m \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$ *un insieme finito* $E_m \subseteq X$ *tale che*

$$X = \bigcup_{e \in E_m} B_{2^{-m}}(e).$$

Per $m = 1$ *scelgo una* $e_1 \in E_1$ *tale che* $B_{2^{-1}}(e)$ *contiene* $a(n)$ *per infiniti valori di* n.
Scelgo anche $k_1 \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$ *tale che* $a(k_1) \in B_{2^{-1}}(e_1)$
Per $m = 2$ *scelgo* $e_2 \in E_2$ *tale che* $B_{2^{-1}}(e) \cap B_{2^{-2}}(e_2)$ *contiene* $a(n)$ *per*

infiniti valori di n e scelgo $k_2 > k_1$ tale che $a(k_2) \in B_{2^{-1}}(e_1) \cap B^{2^{-2}}(e_2)$
Iterando ottengo una sottosuccessione $a(k_l)$ che è di Cauchy (esercizio con la disuguaglianza triangolare)
quindi la sottosuccessione converge.
Segue 2) *e anche* 1).

□

1 Topologia Algebrica

Obiettivo
associarea ogni spazio topologico oggetti algebrici (gruppi, spazi vettoriali, moduli, anelli, ecc..) in modo che prorietà topologiche corrispondano a proprietà algebriche.
Esempi di applicazioni:

1. $\mathbb{R}^2$ e $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ non sono omeomorfi: dimostrazione?

2. $\mathbb{P}^2_{\mathbb{R}}$ e $S^1 \times S^1$ non sono omeomorfi, dimostrazione?

3. Sia $U \subseteq \mathbb{R}^2$ aperto, $A, B : U \to \mathbb{R}$ di classe C^∞.
   Supponiamo, $\frac{\partial A}{\partial y} = \frac{\partial B}{\partial x}$
   Domanda: esiste f di classe C^∞ tale che $A = \frac{\partial f}{\partial x},\ B = \frac{\partial f}{\partial y}$?
   Risposta: dipende da U (e anche da A, B).
   Ad esempio se $U = \mathbb{R}^2$ f esiste $\forall A, \forall B$
   se $U = \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ allora no
   ad esempio $A = \frac{y}{x^2+y^2}, B = \frac{-x}{x^2+y^2}$
   non sono derivate parziali di alcuna $f : \mathbb{R}^2 \setminus \{0\} \to \mathbb{R}$
   (f esiste localmente ma non globalmente)

1.1 Gruppo fondamentale

Definizione 4

1. *Sia X spazio topologico, siano $a, b \in X$. Denotiamo con* $\Omega(X, a, b) = \{\alpha : [0,1] \to X \mid \alpha \text{ continua}, \alpha(0) = a, \alpha(1) = b\}$ *l'insieme dei cammini in X da a a b*

2. *Dati $a, b, c \in X$ e cammini $\alpha \in (X, a, b)$ e $\beta \in \Omega(X, b, c)$ è definita la giunzione* $\alpha \star \beta \in \Omega(X, a, c)$ *con la formula*

$$(a \star b)(t) = \begin{cases} \alpha(2t) & \text{se } t \in [0, \frac{1}{2}] \\ \beta(2t-1) & \text{se } t \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases} .$$

Inoltre si definisce l'inversione $i(\alpha \in \Omega(X, b, a)$ ponendo $i(\alpha)(t) = \alpha(1-t)$

Definizione 5

Siano X spazio topologico, $a, b \in X$ Due cammini $\alpha, \beta \in \Omega(X, a, b)$ sono equivalenti se esiste $F : [0,1] \times [0,1] \to X$ continua tale che

1. $F(t, 0) = \alpha(t) \quad \forall t$

2. $F(t, 1) = \beta(t) \quad \forall t$

3. $F(0, s) = a, \qquad F(1, s) = b \quad \forall s \in [0, 1]$

In tal caso si scrive $\alpha \sim \beta$ e una tale F si dice omotopia di cammini da α a β.

Osservazione:
L'equivalenza di cammini è una relazione di equivalenza.
Verifica:

1. $\alpha \sim \alpha$ basta prendere $F(t, s) = \alpha(t)$

2. se $\alpha \sim \beta$ con omotopia di cammini F da α a β allora $\tilde{F}(t, s) = F(t, 1-s)$ è un'omotopia di cammini da β a α, quindi $\beta \sim \alpha$.

3. Se $\alpha \sim \beta$ tramite F, e $\beta \sim \gamma$ tramite G allora

$$H(t, s) = \begin{cases} F(t, 2s) & s \in [0, \frac{1}{2}] \\ G(t, 2s-1) & s \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases} .$$

   è un'omotopia di cammini da α a γ

Esempio:
Sia $X \subseteq \mathbb{R}^n$ sottoinsieme convesso non vuoto
AGGIUNGI IMMAGINE 4:54

Siano $a, b \in X$ qualsiasi e $\alpha, \beta \in \Omega(X, \alpha, \beta)$ qualsiasi.
Allora $\alpha \sim \beta$, $F(t, s) = (1-s)\alpha(t) + s\beta(t)$
(è ben definita e ha valori in X perché X è convesso)
Osservazione
L'equivalenza di cammini è compatibile con la giunzione:
se $\alpha \sim \alpha', \beta \sim \beta'$ $\alpha \star \beta$ è definita,
Allora $(\alpha \star \beta) \sim (\alpha' \star \beta')$
Siano F omotopia di cammini da α a α' e G da β a β', allora:

$$H(t, s) = \begin{cases} F(2t, s) & t \in [0, \frac{1}{2}] \\ G(2t-1, s) & t \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases} .$$

è omotopia di cammini da $\alpha \star \beta$ a $\alpha' \star \beta'$
Analogamente $i(\alpha) \sim i(\alpha')$

Lemma 2
Siano X spazio topologico $a, b \in X$ $\alpha \in \Omega(X, a, b)$, sia $\Phi : [0, 1] \to [0, 1]$ continua tale che $\Phi(0) = 0$, $\Phi(1) = 1$. Allora $\beta = \alpha \circ \Phi$ è equivalente ad α

Dimostrazione
$\alpha(\Phi(t)) = \beta(t)$ *Un'omotopia di cammini da α a β è* $F(t, s) = \alpha((1-s)t + s\Phi(t))$
□

In generale la giunzione di cammini non è associativa

$$(\alpha \star (\beta \star \gamma))(t) = \begin{cases} \alpha(2t) & t \in [0, \frac{1}{2}] \\ \beta(4t-2) & t \in [\frac{1}{2}, \frac{3}{4}] \\ \gamma(4t-3) & t \in [\frac{3}{4}, 1] \end{cases}$$

$$((\alpha \star \beta) \star \gamma)(t) = \begin{cases} \alpha(4t) & t \in [0, \frac{1}{4}] \\ \beta(4t-1) & t \in [\frac{1}{4}, \frac{1}{2}] \\ \gamma(2t-1) & t \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases}$$

Lemma 3
Sia X spazio topologico, siano $a, b, c, d \in X$, $\alpha \in \Omega(X, a, b), \beta \in \Omega(X, b, c), \gamma \in \Omega(X, c, d)$ allora

$$(\alpha \star \beta) \star \gamma \sim \alpha \star (\beta \star \gamma).$$

Dimostrazione
Basta usare il lemma, con

$$\Phi(t) = \begin{cases} 2t & t \in [0, \frac{1}{4}] \\ t + \frac{1}{4} & t \in [\frac{1}{4}, \frac{1}{2}] \\ \frac{t+1}{2} & t \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases} .$$

è continua e soddisfa:

$$((\alpha \star \beta) \star \gamma)(t) = (\alpha \star (\beta \star \gamma))(\phi(t)).$$

$\square$

Definizione 6 (Cammino costante)
Siano X spazio topologico e $a \in X$, definiamo il cammino costante

$$1_a : [0,1] \to Xt \to a.$$

$1_a \in \Omega(X, a, a)$

Lemma 4
Siano X spazio topologico, $a, b \in X$, $a \in \Omega(X, a, b)$. Allora sono definite le giunzioni $1_a \star \alpha$ e $\alpha \star 1_b$ e valgono

$$1_a \star \alpha \sim \alpha \sim \alpha \star 1_b.$$

$\alpha \star i(\alpha) \sim 1_a$
$i(\alpha) \star \alpha \sim 1_a$

Dimostrazione
Le prime due equivalenze si ottengono con riparametrizzazioni
$(1_a * \alpha)(t) = \alpha(\Phi(t))$ *con* $\Phi(t) = \begin{cases} 0 \quad t \in [0, \frac{1}{2}] \\ 2t - 1 \quad t \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases}$
$(\alpha \star 1_b)(t) = \alpha(\psi(t))$ *con* $\psi(t) = \begin{cases} 2t \quad t \in [0, \frac{1}{2}] \\ 1 \quad t \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases}$
Dimostriamo la terza equivalenza
Scelgo $s \in [0,1]$ percorro α fino ad un certo punto (che dipende da s) poi sto fermo per un po', poi torno indietro lungo $i(\alpha)$
AGGIUNGI IMMAGINE 5 42
Con quest'idea la formula è

$$F(t,s) = \begin{cases} \alpha(2t) \quad t \in [0, \frac{1}{2}s] \\ \alpha(s) \quad t \in [\frac{1}{2}s, 1 - \frac{1}{2}s] \\ \alpha(2 - 2t) \quad t \in [1 - \frac{1}{2}s, 1] \end{cases}.$$

Questa è omotopia di cammini da 1_a a $\alpha \star i(\alpha)$.
L'ultima equivalenza segue dalla terza, scambiando α con $i(\alpha)$ a con b e usando $i(i(\alpha)) = \alpha$ $\square$

Definizione 7 (Gruppo fondamentale)
Sia X spazio topologico e $a \in X$. Il quoziente $\Omega(X, a, a)/\sim = \pi_1(X, a)$ è detto gruppo fondamentale di X con punto base a.

Dato $\alpha \in \Omega(X, a, a)$ useremo la solita notazione
$[\alpha] \in \pi_1(X, a)$

Teorema 3
Nella definizione precedente $\pi_1(X, a)$ è un gruppo con operazione

$$[\alpha] \cdot [\beta] = [\alpha \star \beta].$$

elemento neutro $[1_a]$ e inverso $[\alpha]^{-1} = [i(\alpha)]$

Dimostrazione
Già fatta. □

Notazione 1
Scriveremo semplicemente $[\alpha \star \beta \star \gamma]$ invece di $[(\alpha \star \beta) \star \gamma]$ (l'ordine è importante per i cammini ma non per le classi)

Esempi:

1. $X = \{a\}$, c'è un solo cammino ed è $1_a \in \Omega(X, a, a)$ quindi $\pi_1(X, a) = \{[1_a]\}$ è il gruppo banale.

2. $X = \mathbb{R}^n, a = \text{qualsiasi} \in \mathbb{R}^n$
   Ci sono tanti cammini chiusi con punto base a, ma sono tutti equivalenti dato che $\mathbb{R}^n$ è convesso, quindi

   $$\pi_1(\mathbb{R}^n, a) = \{[1_a]\}.$$

   è banale.

3. Analogamente, se $X \in \mathbb{R}^n$ è convesso, allora $\pi_1(X, a)$ è banale

Lezione N Geometria 2

Federico De Sisti

2025-05-12

0.1 Rivestimenti e svestimenti di alberto agostinelli

Esempi:

1. Sia $p : E \to X$ un omeomorfismo, allora p è un rivestimento. Infatti dato $x \in X$ prendiamo $V \ni x$ aperto banalizzante mettendo $V = X$, Allora:

   $$p^{-1}(V) = E = U_1.$$

   infatti $p|_{U_1} : U_1 \to V$ è semplicemente $p : E \to X$ omeomorfismo.

2. in $\mathbb{R}^2$ prendiamo $E = \mathbb{R} \times \mathbb{Z}$
   $p : E \to \mathbb{R}$
   $(x, n) \to x$
   proiezione sulla prima coordinata.
   È un rivestimento.
   Qui posso prendere $V = \mathbb{R}$ allora $p^{-1}(V) = E = \bigcup_{n\in\mathbb{Z}} \mathbb{R} \times \{n\}$
   $U_n := \mathbb{R} \times \{n\}$ è aperto in E e $p|_{U_n} : U_n \to V$ è omeomorfismo

3. p : $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$
   (x,y) $\to x$
   non è un rivestimento, infatti prendendo $V \ni x(\in \mathbb{R})$ intorno aperto in $\mathbb{R}$ è vero che

   $$p^{-1}(V) = \bigcup_{y\in\mathbb{R}} V \times \{y\}.$$

   con $p|_{V\times\{y\}} V \times \{y\} \to V$ è omeomorfismo
   però $V \times \{y\}$ non è aperto in $\mathbb{R}^2$

4. p: $\mathbb{R} \to S^1$
   t $\to$ (cos$(2\pi t$, sin$(2\pi t))$
   È un rivestimento.
   Non è rivestimento banale poiché se $V = S^1$ fosse aperto banalizzante la sua controimmagine $\mathbb{R}$ sarebbe unione disgiunta di aperti, ciascuno omeomorfo a S^1non è vero perché $\emptyset$ è l'unico compatto aperto di $\mathbb{R}$
   preso $(x_0, y_0) \in S^1$ scegliamo $t_0 \in \mathbb{R}$ tale che $\rho(t_0) = (x_0, y_0)$
   l'intervallo $]t_0 = \frac{1}{4}, t_0 + \frac{1}{4}[$ va nella semicirconferenza che contiene (x_0, v_0) nel mezzo.
   Allora $\rho^{-1}(V) = \bigcup_{n\in\mathbb{Z}}]t_0 - \frac{1}{4} + n, t_0 + \frac{1}{4} + n[$ con $U_n =]t_0 - \frac{1}{5} + n, t_0 + \frac{1}{4} + n[$ sono aperti e disgiunti, ciascuno va omeomorficamente in V tramite ρ (esercizi settimanali)

5. La restrizione $\rho|_{]-2,2[} :]-2, 2[\to S^1$ non è un rivestimento
   Scegliendo V intorno di $(1, 0)$ dato da $V = \rho(] - \varepsilon, \varepsilon[)$ con $\varepsilon > 0$ piccolo.
   allora

   $p|_{]-2.2[})^{-1}(V) =]-2, 2+\varepsilon[\cup]-1-1\varepsilon, -1+\varepsilon[\cup]0-\varepsilon, 0+\varepsilon[\cup]1-\varepsilon, 1+\varepsilon[\cup]2-\varepsilon, 2[$

.

dove il primo e l'ultimo non vanno omomeorficamente su V tramite ρ

Proposizione 1
Sia $p : E \to X$ un rivestimento. Supponiamo X connesso. Allora $|p^{-1}(x)| = |p^{-1}(y)| \quad \forall x, y \in X$

Dimostrazione
Scegliamo $x_0 \in X$ definiamo

$$A = \{x \in X \mid |p^{-1}(x)| = |p^{-1}(x_0)|\}.$$

chiaramente $x_0 \in A$
Sia $V \subseteq X$ aperto banalizzante contenente x_0
Scriviamo

$$p^{-1}(V) = \bigcup_{i \in I} U_i.$$

come nella definizione di rivestimetno allora ciascuna U_i contiene almeno 1 punto che va in x_0
Cioè $|I| = |p^{-1}(x_0)|$
La stessa cosa vale per ogni punto di V. Segue $V \subseteq A$
lo stesso vale con $y \in X$ al posto di x_0 e un aperto canonizzante W contenente y al posto di V, se $y \in A$. Quindi A intorno di ogni punto, cioè A aperto. Se invece $y \notin A$ allora $\subseteq X \setminus A$ per lo stesso ragionamento.
Cioè $X \setminus A$ è aperto, segue $A \in \{X, \emptyset\}$ ma A è non vuoto, quindi $A = X$ $\square$

Esempio
$E = \{a, b, c\}$ topologia discreta
$X = \{d, e\}$ topologia discreta
$p(a) = p(b) = d \quad p(c) = e$
$p^{-1}(V) = \{a, b\} = \{a\} \cup \{b\} := U_1 \cup U_2$
$\forall i \in I = \{1, 2\}$ i U_i è omeomorfo a V tramite p
$e \in X$ ha aperto banalizzante W
$p^{-1}(W) = \{e\} = U_1$ è omeomorfo a W.

Esercizio [ha chiesto all'esame in passato roba simile]
Esempio analogo con meno di 5 punti in totale.

Definizione 1
Sia $p : E \to X$ rivestimento.
Supponiamo X connesso e $|p^{-1}(x)| = d \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall x \in X$. Allora p si dice di grado d.

Esempio

1. $\rho : \mathbb{R} \to S^1$ il solito rivestimento non ha grado finito

2. $\begin{array}{ccc} p: & S^1 & \rightarrow & S^1 \\ & \cos(2\pi t), \sin(2\pi t) & \rightarrow & (\cos(4\pi t), \sin(4\pi t)) \end{array}$ Un modo per dimostrare che p è continua e osservare che

$$p(z) = z^2 \quad se \quad z \in S^1 = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}.$$

analogamente si definiscono rivestimenti $S^1 \to S^1$ di grado $n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$ qualsiasi, ponendo $p(z) = z^n$

0.2 azioni propriamente discontinue

Ogni rivestimento suriettivo è un'identificazione (perchè è aperto) quindi possiamo costruire un rivestimento usando i quozienti.

Definizione 2
Sia E spazio topologico, $G \subseteq Omeo(E)$ sottogruppo. Si dice che G agisca in modo propriamente discontinuo se $\forall e \in E \quad \exists U \subseteq E$ aperto $U \ni e, t.c.$ $U \cap g(U) = \emptyset \quad \forall g \in G \setminus \{Id_E\}$

Esempio

1. $E = \mathbb{R}$ per $n \in \mathbb{Z}$

$$\begin{aligned} f_n : &\mathbb{R} \to \mathbb{R} \\ &x \to x + n \end{aligned}.$$

$G = \{f_n \mid n \in \mathbb{Z}\}$ abbiamo visto E/G è omeomorfo a S^1, Qui G agisce in modo propriamente discontinuo, sia $e \in \mathbb{R}$
Basta prendere $U =]e - \frac{1}{2}, e + \frac{1}{2}[$ e avere
$f_n(U) \cap U = \emptyset \quad \forall n \neq 0$

Teorema 1
Sia E spazio topologico, sia $G \subseteq Omeo(E)$ sottogruppo che agisce in modo propriamente discontinuo, Allora il quoziente $p : E \to E/G$ è un rivestimento.

Dimostrazione
Sappiamo che p è aperta (vale $\forall G$)
Sia $e \in E$ e considero $[e] \in E/G$
Sia $U \subseteq E$ aperto contenente e come nella definizione precedente, poniamo $V = p(U)$, è aperto in E/G
Dimostriamo che V è aperto banalizzante.
$p^{-1}(V) = p^{-1}(p(U)) = \bigcup_{g \in G} g(U) =$ (tutti i punti equivalenti a qualche punto di U)
Verifichiamo che i sottoinsiemi $g(U)$ sono aperti (ok perché $U \subseteq E$ aperto e $q : E \to E$ è omeomorfismo) e disgiunti cioè $g(U) \cap h(U) = \emptyset$ se $g \neq h$

Abbiamo
$g(U) \cap h(U) = h((h^{-1} \circ g)(U) \cap U)$
$= h(\emptyset) = \emptyset$
Quindi ho scritto $p^{-1}(V)$ *come unione disgiunta di aperti di* E.
Fissiamo $g \in G$ *e considero.*

$$p|_g(U) : g(U) \to V.$$

Questa restrizione è continua, ed è aperta perché p *è aperta e* $g(U)$ *è aperta in* E.
Inoltre $p|_{g(U)} : g(U) \to V$ *è iniettiva. Infatti* U *non ha coppie di punti distinti in relazione, quindi* $g(U)$ *neppure (verifica per casa).*
Inoltre $p|_{g(U)} : g(U) \to V$ *è suriettiva, infatti sia* $[u] \in V$ *punto qualsiasi di* V, *con* $u \notin U$ *Allora* $g(u) \in g(U)$ *e*

$$p(g(u)) = [g(u)] = [u].$$

Quindi p *è un rivestimento.* □

0.3 Sollevamento di cammini e omotopie

Definizione 3
Sia $f : X \to Y$ *applicazione fra insiemi qualsiasi. Una sezione di* f *è un'applicazione* $s : Y \to X$ *tale che* $f \circ s = Id_Y$

Osservazione:
Se f ha almeno una sezione, allora f è suriettiva e ogni sua sezione s è iniettiva
Esempio:
La solita $\rho : \mathbb{R} \to S^1$ non ha sezioni continue, perché una sezione continua sarebbe $s : S^1 \to \mathbb{R}$ continua e iniettiva, che non esiste.

Definizione 4
Sia $p : E \to X$ *rivestimento su* $V \subseteq X$ *aperto banalizzante,* $p^{-1}(V) = \bigcup_{i \in I} U_i$ *come nella definizione di rivestimento,* $q = p|_U : U \to V$ *è omeomorfismo , l'inversa* $q^{-1} : V \to U$ *è detta sezione locale di* p.

Definizione 5
Sia $p : E \to X$ *rivestimento, sia* Y *spazio topologico e* $f : Y \to X$ *continua.*
INSERISCI IMMAGINE 17: 27
Un sollevamento q *di* f *è un applicazione continua* $g : Y \to E$ *tale che* $f = p \circ g$

Teorema 2
Siano $p : E \to X, f : Y \to X$ *come nella definizione, siano* $g, h : Y \to E$ *sollevamento di* f*. Supponiamo* Y *connesso, allora* $g(y) = h(y) \quad \forall y \in Y$ *oppure* $g(y) \neq h(y) \quad \forall y \in Y$

Dimostrazione
Sia $A = \{y \in Y \mid g(y) = h(y)\}$
Dimostriamo che A *è sia aperto che chiuso. Sia* $y \in Y$
Sia $V \subseteq X$ *aperto banalizzante,* $V \ni f(y)$*, scriviamo* $p^{-1}(V) = \bigcup_{i \in I} U_i$ *come nella definizione.*
Visto che $f = p \circ g$ *e anche* $f = p \circ h$ *abbiamo* $g(y), h(y) \in p^{-1}(V)$
Siano $i, j \in I$ *tale che*

$$U_i \ni g(y), \quad U_j \ni h(y).$$

(eventualmente $i = j$*)*
Sia $W = g^{-1}(U_i) \cap h^{-1}(U_j)$
è aperto in Y *e contiene* g
Supponiamo $g(y) = h(y)$ *cioè* $y \in A$, $i = j$.
Allora $w \in W$ *abbiamo*

$$p(g(w)) = p(h(w)) = f(w).$$

Allora $g(w), h(w)$ *sono punti dello stesso* U_i *che vanno entrami in* $f(W)$ *tramite* p.
Ma $p|_{U_i} U_i \to V$ *è iniettiva, quindi* $g(w) = h(w)$*. Segue* $W \subseteq A$ *intorno aperto di* y
Quindi A *è aperto*
Supponiamo $g(y) \neq h(y)$*, cioè* $y \notin A$
Allora $U_i \neq U_j$ *e* $i \neq j$*, perché* U_i *ha solo il punto* $g(y)$ *che va in* $f(y)$ *tramite* p
Ma allora $U_i \cap U_j = \emptyset$*, da cui* $g(w) \in U_i, h(w) \in U_j$ *devono essere diversi* $\forall w \in W$*.. Quindi* $W \subseteq Y \setminus A$*, cioè* A *è chiuso*
Y *è connesso, quindi* $A = Y$ *oppure* $A = \emptyset$ □

Teorema 3 (Sollevameto dei cammini)
Siano $p : E \to X$ *un rivestimento*
$\alpha : [0, 1] \to X$ *cammino, sia* $e \in E$ *tale che* $p(e) = \alpha(0)$ *Allora* $\exists!$ *sollevamento*

$$\alpha_e^{\uparrow} : [0, 1] \to E.$$

di α *tale che* $\alpha_e^{\uparrow}(0) = e$

Dimostrazione
Sia $R = \{V \subseteq X,$ *aperto banalizzante* $\}$
è ricoprimento aperto di X*. Applichiamo il corollario al teorema del numero di Lebesgue otteniamo* $n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ *e aperti* $V_1, \ldots, V_n$ *banalizzanti tali che*

$$\alpha([\frac{i-1}{n}, \frac{i}{n}]) \subset V_i.$$

Considero $s_1 : V \to p^{-1}(V_1)$
se locale tale che $s_1(\alpha(0)) = e$ *definisco* $\alpha_1 : [0, \frac{1}{n}] \to E$
come $\alpha_1 = s_1 \circ \alpha$
Chiaramente α_1 *solleva* $\alpha|_{[0,\frac{1}{n}]}$ *ricoperto da* $e_2 = \alpha_1(\frac{1}{n}) \in E$ *uso la sezione locale* $s_2 : V_2 \to p^{-1}(V_2)$ *tale che* $s(\alpha(\frac{1}{n})) = e_2$
e definisco $\alpha_2 : [\frac{1}{n}, \frac{2}{n}] \to E$ *come* $a\alpha_2 = s_2 \circ \alpha$
Iterando ottengo

$$\alpha : [\frac{i-1}{n}, \frac{i}{n}] \to E.$$

che si incollano per costruzione al cammino $\alpha_e^{\uparrow}$ $\square$

Lezione N+1

Federico De Sisti

2025-05-13

0.1 Sollevamenti di cammini

Esempi

1. $\rho : \mathbb{R} \to S^1$
   solito rivestimento,
   $\alpha : [0,1] \to S^1$

   t $\to (\cos(2\pi t), \sin(2\pi t))$

   $\alpha \in \Omega(S^1, (1,0), (1,0))$
   I numeri $t \in \mathbb{R}$ t.c. $\rho(t) = a$ sono gli interi.
   Possiamo sollevare α partendo da

   $$\begin{aligned} \alpha_0^{\uparrow} : [0,1] \to & \mathbb{R} \to S^1 \\ & \qquad t \to (\cos(2\pi t), \sin(2\pi t)). \\ t \to & ? \end{aligned}$$

   dove "?" è tale che composto con ρ fa α
   quindi $\alpha_0^{\uparrow}(t) = t$
   Posso partire da qualunque $n \in \mathbb{Z}$:
   $\alpha_3^t(t) = t + 3$
   Composto con ρ da α e parte da 3
   Potrei usare

   $$\begin{aligned} \beta : & [0,1] \to S^1 \\ & t \to (\cos(-6\pi t), \sin(-6\pi t)) \end{aligned}.$$

   Esempi di sollevamento:
   $\beta_5^{\uparrow}(t) = 5 - 3t$

Teorema 1 (Sollevamento delle omotopie di cammini)
Sia $p : E \to X$ un rivestimento, $F : [0,1] \times [0,1] \to X$ continua,
$e \in E$ tale che $p(e) = F(0,0)$.
Allora esiste un unico sollevamento $g : [0,1] \times [0,1] \to E$ di F tale che $G(0,0) = e$.

Dimostrazione
L'unicità segue dal teorema di unicità dei sollevamenti (quello di $Y \xrightarrow{f} X$ è Y connesso). Dimostriamo l'esistenza di G.
Considero $F(-,0)$ è un cammino $[0,1] \to X$ e anche $F(0,-)$ è un cammino $[0,1] \to X$
Solleviamo partendo da e, otteniamo i sollevamenti

$$\alpha : [0,1] \to E.$$

$$\beta : [0,1] \to E.$$

Soddisfano
$p(\alpha(t)) = F(t,0)$

$p(\beta(t)) = F(0,t)$
e coincidono per $t = 0$
Definiamo $L : ([0,1] \times \{0\}) \cup (\{0\} \times [0,1]) \subseteq Q = [0,1] \times [0,1]$
Definiamo

$$\begin{aligned} g : L &\to E \\ (t,s) &\to \begin{cases} \alpha(t) & se\ s = 0 \\ \beta(s) & se\ t = 0 \end{cases} . \end{aligned}$$

g è continua e solleva

$$F|_L : L \to X.$$

Quindi vogliamo dimostrare che esiste G sottoinsieme di F che coincide con g su $L \subseteq Q$
Passo 1:
Supponiamo l'immagine di F contenuta in un aperto banalizzante $V \subseteq X$.
Sia $p^{-1}(V) = \bigcup_{i \in I} U_i$ come nella definizione.
L è connesso, $g(L)$ è connesso, e contenuto in $p^{-1}(V)$
Per connessione esiste un unico $i_0 \in I$ tale che $g(L) \subseteq U_{i_0}$
Sia $s : V \to U_{i_0}$ la sezione locale, poniamo $G = s \circ F$ questa solleva F
Coincide con g su L per l'unicità dei sollevamenti.
Passo 2: caso generale.
Non supponiamo $Im(F)$ contenuta in un aperto banalizzante.
Dal teorema del numero di Lebesgue esiste $n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$ tale che

$$\left[\frac{i-1}{n}, \frac{i}{n}\right] \times \left[\frac{i-1}{n}, \frac{i}{n}\right] = Q_{i,j}.$$

un singolo aperto banalizzante $V_{i,h} \subseteq X$
Se sollevo ogni quadratino in ordine con continuità, posso "appiccicarlo" a quelli vecchi, così che la mia funzione non abbia "salti" e sia quindi discontinua
Per il passo 1, posso sollevare $F|_{Q_{i,j}}$
Per assicurare che questi sollevamenti si incollino, ordiniamo i $Q_{i,j}$ la coppia definiamo $(i,j) \leq (h,k) \Leftrightarrow \begin{cases} i+k < h+k \\ i+j = h+k, \quad i \leq k \end{cases}$ Aggiungi foto 6:00 13 maggio.
Vale: i lati inferiore e sinistro di $Q_{i,j}$ sono contenuti in

$$L \cup \bigcup_{(a,b)<(i,j)} Q_{a,b}.$$

Patiamo da $Q_{1,1}$: per il passo 1 esiste, un sollevamento:

$$\tilde{G}_{1,1} : Q_{1,1} \to E.$$

tale che $\tilde{G}(0,0) = e$, e $\tilde{G}$ solleva $F|_{Q_{1,1}} : Q_{1,1} \to X$
Per l'unicità dei sollevamenti, g e $\tilde{G}_{1,1}$ si incollano a un sollevamento

$G_{1,1} : L \cup Q_{1,1} \to E$ di $F|_{L \cup Q_{1,1}}$
Il quadrato successivo è $Q_{2,1}$, per il passo 1 esiste $\tilde{G}_{2,1} : Q_{2,1} \to E$ che solleva $F|_{G_{2,1}}$ e tale che $\tilde{G}_{2,1}\left(\frac{1}{n}, 0\right) = G_{1,1}(\frac{1}{n}, 0)$
Di nuovo $\tilde{G}_{2,1} e G_{1,1}$ si incollano a un sollevamento

$$G_{2,1} : L \cup Q_{1,1} \cup Q_{2,1} \to E.$$

che solleva:
$F|_{L \cup Q_{1,1} \cup Q_{2,1}}$
iterando sollevo $F|_{Q_{i,j}}$ a un'applicazione $G_{i,j} : Q_{i,j} \to E$
che si incolla alla precedente ottenendo

$$G_{i,j} : L \cup \left(\bigcup_{(a,b) \le (i,j)} Q_{(a,b)} \right) \to E.$$

Il sollevamento richiesto di F è $G_{n,n} : Q \to E$. $\square$

Teorema 2
Sia $p : E \to X$ un rivestimento, scegliamo $a, b \in X$ e $\alpha, \beta \in \Omega(X, a, b)$ scegliamo $e \in E$ tale che $p(e) = a$ considero i sollevamenti $\alpha_e^{\uparrow}, \beta_e^{\uparrow}$.
Allora sono equivalenti

1. *$\alpha \sim \beta$*
2. *$\alpha_e^{\uparrow}(1) = \beta_e^{\uparrow}(1)$ e $\alpha_e^{\uparrow} \sim \beta_e^{\uparrow}$*

Dimostrazione
(2) $\Rightarrow$ (1) *è facile*
se $\alpha_e^{\uparrow}(1) = \beta_e^{\uparrow}(1)$ ed esiste un omomorfismo di cammini G di $\alpha_e^{\uparrow}$ a $\beta_e^{\uparrow}$
allora $p \circ G = F : [0,1] \times [0,1] \to X$
è un omotopia di cammini da α a β
(verifica per esercizio)
(1) $\Rightarrow$ (2)
Sia F omotopia di cammini in X da α a β.
Per il teorema precedente posso sollevare F a $G : [0,1] \times [0,1] \to E$
tale che $G(0,0) = e$.
Dobbiamo dimostrare che G è omotopia di cammini da $\alpha_e^{\uparrow}$ a $\beta_e^{\uparrow}$, e che $\alpha_e^{\uparrow}(1) = \beta_e^{\uparrow}(1)$.
Foto 6:40
A) $F(-,0) = \alpha$, $G(-,0)$ è sollevamento di $F(-,0) = \alpha$
e parte da $G(0,0) = e$
segue $G(-,0) = \alpha_e^{\uparrow}$ per l'unicità dei sollevamenti.
B) $G(0,-)$ solleva $F(0,-)$ partendo da $G(0,0) = e$
Ma $F(0,-) = 1_a$ perché F è omotopia di cammino.
Quindi $G(0,-)$ solleva 1_a partendo da e, ma anche 1_e solleva 1_a partendo da e

Per l'unicità $G(0,-) = 1_e$
Analogamente $F(1,-) = 1_b$
e il cammino $G(1,-)$ *parte da* $G(1,0) = \alpha_e^{\uparrow}(1)$ *e solleva* 1_b *come prima* $G(1,-)$ *è costante e vale* $G(1,0) = 1_{\alpha_e^{\uparrow}(1)}$
C) $G(-,1)$ *solleva* $F(-,1) = \beta$, *parte da* $G(0,1) =$ *punto finale di* $G(0,-) = 1_e$ *quindi* $G(-,1)$ *pare da* e, *quindi per l'unicità* $G(-,1) = \beta_e^{\uparrow}$
Segue:
$\beta_e^{\uparrow}(1) = G(1,1) = 1_{\alpha_e^{\uparrow}(1)}(1) = \alpha_e^{\uparrow}(1)$
inoltre G *è omotopia di cammini da* $\alpha_e^{\uparrow}$ *a* $\beta_e^{\uparrow}$ □

Usiamo subito questo teorema per calcolare il primo gruppo fondamentale non banale, quello di S^1

Corollario 1
$\pi_1(S^1) \cong \mathbb{Z}$.
Precisamente, sia $a = (1,0)$ *definiamo*
$\alpha^{(n)} : [0,1] \to S^1$
$t \to (\cos(2\pi nt), \sin(2\pi nt))$
Definiamo
$\Sigma : Z \to \pi(S^1, a)$
$n \to [a^{(n)}]$
Allora Σ *è isomorfismo di gruppi*

Dimostrazione
Assumiamo Σ *omomorfismo, dimostriamo che è iniettivo, siano* $n, m \in \mathbb{Z}$, *assumiamo* $\Sigma(n) = \Sigma(m)$
cioè $\alpha^{(n)} \sim \alpha^{(m)}$.
Considero il rivestimento solito $\rho : \mathbb{R} \to S^1$
solleviamo $\alpha^{(n)}$ *e* $\alpha^{(m)}$ *partendo da* $0 \in \mathbb{R}$

$$(\alpha^{(n)})_0^{\uparrow}(t) = nt.$$

$$(\alpha^{(m)})_0^{\uparrow}(t) = mt.$$

Per il teorema, questi hanno stesso punto finale: $n \cdot 1 = m \cdot 1$ *cioè* $n = m$ □

Lezione N+2 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-05-19

0.1 Fine della dimostrazione precedente

$$\begin{aligned}\Sigma :&\mathbb{Z} \to \pi(S^1, a)\\ &n \to [a^{(n)}]\end{aligned}.$$

$$\begin{aligned}\alpha^{(n)} :&[0,1] \to S^1\\ &t \to (\cos(2\pi nt), \sin(2\pi nt))\end{aligned}.$$

Dimostrazione
Abbiamo visto Σ iniettiva, dimostriamo che è omomorfismo di gruppi,
Siano $n, m \in \mathbb{Z}$, dobbiamo dimostrare

$$\Sigma(n+m) = \Sigma(n) \cdot \Sigma(m).$$

□

Abbiamo $\Sigma(n+m) = [\alpha^{(n+m)}]$
$\Sigma(n) \cdot \Sigma(m) = [\alpha^{(n)}] \cdot [\alpha^{(m)}] = [\alpha^{(n)} \star \alpha^{(m)}]$
Confrontiamo i sollevamenti dei cammini $\alpha^{(n+m)}.\alpha^{(n)} \star \alpha^{(m)}$ sul rivestimento $: \mathbb{R} \to S^1$ solito.
Solleviamo α^{n+m} ottenendo (partendo da 0)
$(\alpha^{n+m})_0^{\uparrow}(t) = (n+m)t$, parte da 0 e finisce in $n+m \in \mathbb{R}$.
Solleviamo $\alpha^{(n)} \star \alpha^{(m)}$ in questo modo:
solleviamo $\alpha^{(n)}$ partendo da 0, otteniamo $(\alpha^{(n)})_0^{\uparrow}(t) = nt$, parte da 9 e finisce in n.
Poi solleviamo $\alpha^{(m)}$ partendo da n, otteniamo

$$(\alpha^m)_n^{\uparrow} = n + nt.$$

La giunzione $(\alpha^{(n)})_0^{\uparrow} \star (\alpha^{(m)})_n^{\uparrow}$ è definita e solleva $\alpha^{(n)} \star \alpha^{(m)}$.
Allora i sollevamenti partono da 0 e finiscono in $n+m$ entrambi. Visto che $\mathbb{R}$ è convesso, questi sollevamenti sono equivalenti, segue

$$\alpha^{(n+m)} \sim \alpha^{(n)} \star \alpha^{(m)}.$$

Quindi Σ è omeomorfismo di gruppi.
Dimostriamo che Σ è suriettiva.
Sia $\alpha \in \Omega(S^1, a, a)$ dimostriamo che $\exists n \in \mathbb{Z} \quad [a]^{(?)} = [\alpha^{(n)}] = \Sigma(n)$
Solleviamo α partendo da 0, otteniamo

$$\alpha_0^{\uparrow} : [0,1] \to \mathbb{R}.$$

fissiamo un punto di $\mathbb{R}$ che non viene mandato in $a \in S^1$ da ρ, Cioè $\alpha_0^{\uparrow}$ finisce in $n \in \mathbb{Z}$
Confrontiamo α con $\alpha^{(n)}$, i loro sollevamenti $\alpha_0^{\uparrow}, (\alpha^{(n)})_0^{\uparrow}$ partono da 0, finiscono in n, e sono equivalenti ($\mathbb{R}$ convesso). Segue $\alpha \sim \alpha^{(n)}$, cioè

$$\Sigma(n) = [\alpha^{(n)}] = [\alpha].$$

□

Corollario 1
S^1 non è retratto di D^2, e $a = (1, 0)$ non è retratto per deformazione di S^1.

Dimostrazione
Se per assurdo S^1 fosse retratto di D^2

$$i_* : \pi(S^1, a) \to \pi(D^2, a).$$

sarebbe iniettiva, assurdo perché avrei

$$\mathbb{Z} \to \{[1_a]\}.$$

iniettiva.

Per assurdo se $\{a\}$ fosse retratto per deformazione di S^1, allora $\pi_1(S^1, a) \cong \pi(\{a\}, a)$ che è banale, assurdo. □

0.2 Teoremi di Brouwer e Barsuk

Teorema 1 (Brouwer)
Sia $f : D^2 \to D^2$ continua, allora $\exists p \in D^2$ $f(p) = p$

Dimostrazione
Per assurdo suppongo $f(p) \neq p \quad \forall p \in D^2$
Sia $g(p)$ il punto di intersezione fra S^1 e la retta che contiene p e $f(p)$, quello più vicino a p (vedi esercizi settimanali per formula di $g(p)$)
Si verifica dalla formula che

$$g : D^2 \to S^1.$$

è continua.
Se $q \in S^1$ allora $g(q) = q$, cioè g è retrazione, assurdo. □

Esercizio:
Sia $p : \exists \to X$ rivestimento e sia $f : \S^2 \to X$ continua, siano $y \in S^2$ e $e \in E$ tale che $p(e) = f(p)$
Dimostrare che $\exists g : S^2 \to E$ sollevamento di f tale che $g(y) = e$
(Suggerimento: Dimostrare che S^2 è omeomorfa a $\frac{[0,1]\times[0,1]}{\sim}$ per una relazione d'equivalenza $\sim$.
Usare questo per avere un'applicazione $\tilde{f} : [0, 1] \times [0, 1] \to X$ e sollevare $\tilde{f}$).

Teorema 2 (Borsuk)
Non esistono applicazioni continue dispari $S^2 \to S^1$,
cioè tali che $f(-p) = -f(p)$.

Dimostrazione
Sia $\rho : \mathbb{R} \to S^1$ il solito rivestimento, per l'esercizio ogni $f : S^2 \to S^1$ si solleva

a $g : S^2 \to \mathbb{R}$.
supponiamo per assurdo f continua dispari. D'altronde $\exists p_0 \in S^2$ tale che $g(p_0) = -g(-p_0)$
Allora $f(p_0) = f(-p_0) = -f(p_0)$. *(dispari)*
cioè $f(p_0) \in S^1$ assurdo $\square$

Corollario 2
Sia $g : S^2 \to \mathbb{R}^2$ continua, allora esiste $x_0 \in S^1$ tale che $g(x_0) = g(-x_0)$

Dimostrazione
Per assurdo supponiamo $g(x) \neq g(-x) \quad \forall x \in S^1$
allora:

$$f(x) = \frac{g(x) - g(-x)}{\|g(x) - g(-x)\|}.$$

Allora f è continua e dispari $S^2 \to S^1$, assurdo $\square$

Corollario 3
Sia $A \subseteq \mathbb{R}^m$ aperto non vuoto con $m \geq 3$, sia $B \subseteq \mathbb{R}^2$ aperto. Allora A e B non sono omeomorfi (in particolare $\mathbb{R}^2$ non è omeomorfo a $\mathbb{R}^m$ con $m \geq 3$)

Dimostrazione
Sia $a \in A$ allora $\exists \varepsilon > 0$ tale che $B_\varepsilon(a) \subseteq A$. Allora $S = \partial B_{\varepsilon/2}(a)$ è contenuta in A e S è omeomorfo a S^{m-1}.
S^{m-1} contiene sottospazi omeomorfi a S^2 (ad esempio $S^{m-1} \cap$ (span dei primi 3 vettori della base canonica)
Allora anche S contiene almeno un sottospazio $\tilde{S}$ omeomorfo a S^2
Sia per assurdo $h : A \to B$ omeomorfismo allora $h|_{\tilde{S}} : \tilde{S} \to \mathbb{R}^2$ è continua e iniettiva con $\tilde{S}$ omeomorfo a S^2 assurdo. $\square$

0.3 Altri legami fra rivestimenti e gruppi fondamentali

Teorema 3
Sia $p : E \to X$ rivestimento, sia $e \in E, x = p(e)$.

1. *$p_* \pi_1(E, e) \to \pi_1(X, x)$ è iniettiva.*
2. *L'immagine di p_* è l'insieme delle classi $[\alpha]$ dei cammini α tale che $\alpha_e^\uparrow$ è un cammino chiuso.*

3. *Se E è connesso per archi allora c'è una biezione*

$$p_*(\pi(E,e)\backslash\pi_1(X,x) \to p^{-1}(x).$$

dove il primo è il quoziente delle classi laterali destre data da

$$p_*(\pi(E,e))[\alpha] \to \alpha_e^{\uparrow}(1).$$

$(\alpha \in \Omega(X,x,x)[\alpha \in \pi_1(X,x), p_*(\pi_1(E,e))[\alpha]$ è la classe laterale destra$)$

Dimostrazione
Dimostriamo singolarmente le affermazioni

1. *Supponiamo che $p_* : \pi_1(E, e \to \pi_1(X,e)$ è omeomorfismo di gruppi. Dimostriamo che è iniettivo, calcoliamo $\ker(p_*)$. Sia $[\beta] \in \pi_1(E,e)$ con $\beta \in \Omega(E,e,e)$, allora $p_*([\beta]) = [p \circ \beta]$*
Supponiamo sia l'elemento neutro $[1_x]$ cioè $p \circ \beta \sim 1_x$ in X
Solleviamo partendo da e. otteniamo β (che solleva $p \circ \beta$) e 1_e
Segue $\beta \sim 1$ e cioè
$[\beta] = [1_e]$ elemento neutro, cioè p_* iniettiva.

2. *Da dimostrare $[\alpha] \in \pi_1(X,x)$ è in $Im(p_*)$ se e solo se è cammino chiuso. Sia $[\alpha] \in Im(p_*)$ allora*

$$[\alpha] = [p \circ \beta] \text{ dove } \beta \in \Omega(E,e,e).$$

Solleviamo α e $p \circ \beta$ partendo da $e \in E$: otteniamo $\alpha_e^{\uparrow}$ e β. Questi sollevamenti hanno stesso punto finale $\beta(1) = e$, quindi $\alpha(1) = e$, cioè $\gamma = \alpha_e^{\uparrow}$ è un cammino chiuso.
Quindi definisce la classe $[\alpha_e^{\uparrow}] \in \pi_1(E,e)$ e vale
$p_*([\alpha_e^{\uparrow}]) = [p \circ \alpha_e^{\uparrow}] = [\alpha]$

3. *L'applicazione è*

$$\phi : p_*(\pi(E,e)\backslash\pi_1(X,x) \to p^{-1}(x).$$

$p_*(\pi_1(E,e))[\alpha] \to \alpha_e^{\uparrow}(1)$
Dobbiamo dimostrare che ϕ è ben definita. Intanto se $\alpha' \sim \alpha$ in $\pi_1(X,x)$ allora

$$(a')_e^{\uparrow}(1) = \alpha_e^{\uparrow}(1).$$

Quindi ϕ non dipende da $\alpha \in [\alpha']$.
Supponiamo di cambiare rappresentante nella stessa classe laterale destra, cioè consideriamo $[\gamma] = [\alpha]$ dove $[\gamma] \in p_*(\pi_1(E,e))$.
Per 2) quando sollevo γ rimane chiuso. Per definire ϕ usando $[\gamma] \cdot [\alpha]$ al posto di α, uso il punto finale di $(\gamma * \alpha)_e^{\uparrow}$ perché $[\gamma][\alpha] = [\gamma \star \alpha]$
Solleviamo $\gamma \star \alpha$: è

$$\gamma_e^{\uparrow} \star \alpha_{\gamma_e^{\uparrow}(1)}^{\uparrow}.$$

ma essendo $\gamma_e^{\uparrow}$ un cammino chiuso, i punto finale è e stesso, e il sollevamento di $\gamma \star \alpha$ è $\gamma_e^{\uparrow} \star \alpha_e^{\uparrow}$, il suo punto finale è $\alpha_e^{\uparrow}(1)$, che è lo stesso ottenuto prima. Quindi ϕ è ben definita.
Dimostriamo che ϕ è iniettiva, siamo $[\alpha], [\delta] \in \pi_1(X, x)$, supponiamo le loro classi laterali destre vengano mandate nello stesso punto da ϕ. Cioè $\alpha_e^{\uparrow}$ e $\delta_e^{\uparrow}$ finiscono nello stesso punto. Allora è definita la giunzione $\alpha_e^{\uparrow} \star i(\delta_e^{\uparrow})$ che è un cammino chiuso in E, e solleva $\alpha \star i(\delta)$, quindi $\alpha \star i(\delta)$ se lo solleva rimane chiuso, e allora la sua classe

$$[\alpha \star i(\delta) = [\alpha] \cdot [\delta]^{-1}.$$

è in $p_\star(\pi_1(E, e))$ per 2)
Segue che $[\alpha]$ e $[\delta]$ sono nella stessa classe laterale destra modulo $p_*(\pi_1(E, e)$.
Quindi ϕ è iniettiva, dimostriamo che è suriettiva.
Cioè $\forall e \in p^{-1}(x)$ deve esistere $\alpha \in \pi_1(X, x)$ tale che $\alpha_e^{\uparrow}(1) = e'$
Dato che E è connesso per archi, scegliamo $\gamma \in \Omega(E, e, e')$.
Allora γ solleva $\alpha = p \circ \gamma$.
La classe $[\alpha] \in \pi_1(X, x)$ soddisfa $p_*(\pi(E, e))[\alpha] \xrightarrow{\varphi} \gamma(1) = e'$.
Quindi ϕ è suriettiva.

$\square$

Corollario 4
$\pi_1(\mathbb{P}^n_{\mathbb{R}}) \cong \dfrac{\mathbb{Z}}{2\mathbb{Z}}$ *se* $n \geq 2$

Osservazione
$n = 2$ considero la proiezione

$$\mathrm{R}^3 \setminus \{0\} \to \mathbb{P}^2_{\mathbb{R}} \qquad v \to [v].$$

e la restringo a S^2

$$p : S^2 \to \mathbb{P}^2_{\mathbb{R}}.$$

Si dimostra che p è un rivestimento.
Consideriamo $X = S^2 \cap \{z \geq 0\}$ ovvero la semisfera positiva.
INSERISCI IMMAGINE 5:35
$\alpha \neq 1_N$

0.4 Classificazione dei rivestimenti

Esempio:
$\pi_1(S^1) \cong \mathbb{Z}$

Sottogruppi: $\mathbb{Z}, \{0\}, n\mathbb{Z}$ con $n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$
Rivestimenti connessi per archi di S^1:
Id: $\mathrm{S}^1 \to S^1$

$\rho : \mathbb{R} \to S^1$

$\mathrm{S}^1 \to S^1$

$\mathrm{z} \to z^n$

Teorema 4
Sia X spazio topologico, $a \in X$. Supponiamo $x \in X$ abbia un sistema fondamentale di intorni semplicemente connessi. Supponiamo X abbia un rivestimento con spazio totale semplicemente connesso. Allora esiste una biezione tra

$$\left\{\substack{\text{rivestimenti } p:E\to X \\ \text{con } E \text{ conn. per archi}}\right\} \to \{\text{sottogruppi di } \pi_1(X,a)\}.$$

$$[p] \to p_*(\pi(E,a)).$$

dove $e \in E$ soddisfa $p(e) = a$, e due rivestimenti $p : E \to X$ e $p' : E' \to X$ sono equivalenti se $\exists f : E \to E'$ omeomorfismo tale che
INSERISCI IMMAGINE 5 50
commuta, cioè $p = p' \circ f$.

Lezione N+3 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-05-20

0.1 dimostrazione ultimo corollario

Corollario 1
$\pi_1(\mathbb{P}^n_{\mathbb{R}}) \cong \frac{\mathbb{Z}}{2\mathbb{Z}}\ \forall n \geq 2$

Dimostrazione
Negli esercizi settimanali è dato un rivestimento

$$S^n \to \mathbb{P}^n_{\mathbb{R}}.$$

di grado $2\ \ \forall n \geq 1$
Per il teorema di ieri:

$$p^{-1}(x) \leftrightarrow p_*(\pi_1(S^1))\backslash\pi_1(\mathbb{P}^n_{\mathbb{R}}).$$

dove $x = \mathbb{P}^n_{\mathbb{R}}$ *Se* $n \geq 2$ *allora* $\pi_1(S^n)$ *è banale, quindi* $p_*(\pi(S^n))$ *è banale, e* $p_*(\pi_1(S^1))\backslash\pi_1(\mathbb{P}^n_{\mathbb{R}})$ *è in biezione con* $\pi_1(\mathbb{P}^n_{\mathbb{R}})$
Quindi $\pi_1(\mathbb{P}^n_{\mathbb{R}})$ *ha solo due elementi da cui* $\cong \frac{\mathbb{Z}}{2\mathbb{Z}}$ □

1 Geometria differenziale

1.1 Varietà topologiche e differenziali

Definizione 1
Sia X *spazio topologico. Esso si dice una varietà topologica di dimensione* $n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ *se*

1. X *di Hausdoff*
2. $\forall x \in X$ *esistono un intorno aperto* $U \subseteq X$ *di* x*, un aperot* $V \subseteq \mathbb{R}^n$ *e un omeomorfismo* $\varphi : U \to V$ *detto carta locale*
3. X *è* 2^o*-numerabile.*

Una collezione di triple (U, V, φ) *tali che i sottoinsiemi* U *ricoprono* X *è detta atlante.*

Esempi:

1. $\mathbb{R}^n$ è una varietà topologica di dimensione n (basta una carta locale $U = V = \mathbb{R}^n$, $Id_{\mathbb{R}^n} = \varphi$)
2. S^n è varietà topologica di dimensione n, per esempio posso prendere l'atlante

$$U_1 = S^n \setminus \{(0, \dots, 0, 1)\}$$
$$U_2 = S^n \setminus \{(0, \dots, 0, -1)\}.$$

$V_1 = V_2 = \mathbb{R}^n$
$U_1 \to V_1$ proiezione stereografica

3. T = toro in $\mathbb{R}^3$
   AGGIUNGI IMMAGINE 5 39
   (il toro è omeomorfo a $S^1 \times S^1$ e al quoziente di un quadrato)

4. Ciambelle con tanti buchi
   sono varietà di dimensione 2
   AGGIUNGI Immagine

5. $\mathbb{P}^n_{\mathbb{R}}$ è varietà topologica di dimensione n :
   carte locali U_i dove
   $$U_i = \{[x_0, \dots, x_n] \mid x_i \neq 0\}.$$
   $\varphi : U_i \to V_i = \mathbb{R}^n$
   $[x_0, \dots, x_n] \to (\frac{x_0}{x_i}, \dots, \frac{x_{i-1}}{x_i}, \frac{x_{i+1}}{x_i}, \dots, \frac{x_n}{x_i})$
   è ben definita, <u>continua</u> (verifica per esercizio)
   ed è omeomorfismo perchè ha inversa
   $$\begin{gathered} V_i \to U_i \\ (y_0, \dots, y_n) \to [y_0, \dots, y_{i-1}, 1, y_{i+1}, \dots y_n] \end{gathered}.$$

6. $\mathbb{C}^n$ e $\mathbb{P}^n_{\mathbb{C}}$ sono varietà topologiche di dimensione $2n$

Definizione 2
Sia A atlante di una varietà topologica di dimensione n. A si dice C^∞ se per ogni
$$(U_1, V_1, \varphi_1), \quad (U_2, V_2, \varphi_2) \in A.$$
la composizione
$$\varphi_2 \circ \varphi_1^{-1}|_{\varphi_1(U_1 \cap U_2)} : \varphi_1(U_1 \cap U_2) \to \varphi_2(U_1 \cap U_2).$$
è di classe C^∞ se $U_1 \cap U_2 \neq \emptyset$

Esempi

1. Gli atlanti visti prima per $\mathbb{R}^n, S^n, T, \mathbb{P}^n_{\mathbb{R}}, \mathbb{C}^n, \mathbb{P}^n_{\mathbb{C}}$, sono tutti C^∞

2. Se X ha un atlante fatto da due sole carte locali, allora questo atlante è C^∞

Definizione 3
Siano A, B due atlanti C^∞ di una stessa varietà topologica si dicono compatibili se $A \cup B$ è C^∞

Osservazione
Si verifica facilmente che la compatibilità è una relazione d'equivalenza.

Definizione 4
Una varietà differenziale di dimensione n è una varietà topologica di dimensione n con una classe di equivalenza di atlanti C^∞

Esempio
$X = \mathbb{R}$
$A = \{(U_1, V_1, \varphi_1)\}$ $U_1 = X$, $V_1 = \mathbb{R}$ $\varphi_1 = Id_X$ è atlante C^∞
$B = \{(U_2, V_2, \varphi_2)\}$ $U_2 = X$ $V_2 = \mathbb{R}$
$\varphi_2 : X = \mathbb{R} \to \mathbb{R}$
x $\to x^3$
omeomorfismo
A e B non sono compatibili, i cambi di coordinate sono

$$\begin{aligned} \varphi_2 \circ \varphi_1^{-1} : V_1 &\to V_2 \\ x &\to x^3 \end{aligned}.$$

$$\begin{aligned} \varphi_1 \circ \varphi_2^{-1} : V_2 &\to V_1 \\ x &\to \sqrt[3]{x} \end{aligned}.$$

è continua, biettiva non C^∞

1.2 Varietà differenziabili immerse in $\mathbb{R}^N$

Definizione 5 (Varietà differenziabile immersa in $\mathbb{R}^N$)
Sia $X \subseteq \mathbb{R}^N$ sottospazio topologico ($N \geq 0$). X è detta varietà differenziabile immersa in $\mathbb{R}^N$ di dimensione $m \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ se $\forall x \in X$ esistono $U \subseteq X$ intorno aperto di $x, V \subseteq \mathbb{R}^m$ aperto,

$$\psi : V \to U \subseteq \mathbb{R}^N.$$

tale che

1. *ψ è omeomorfismo*
2. *ψ è C^∞ come applicazione $V \to \mathbb{R}^N$ con $V \subseteq \mathbb{R}^m$ aperto*
3. *$\forall q \in V$ il differenziale di $d\psi_q$ è iniettivo ($d\psi_q : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^n$ è l'applicazione lineare di matrice canonica Jacobiana di ψ in q)*

le ψ si dicono parametrizzazione
Gli aperti U si dicono aperti coordinati.

Nota
In letteratura spesso "carte locali" e "parametrizzazioni" sono sinonimi.
Invece di "immerse" si dice spesso "immerse regolarmente", e in inglese questo

"immerse" corrisponde a "embedded" **Esempi:**

1. S^1 è varietà differenziabile immersa in $\mathbb{R}^2$

$$\begin{aligned} \psi_1 :]0, 2\pi[&\to U_1 = S^1 \setminus \{(1,0)\} \\ t &\to (\cos(t), \sin(t)) \end{aligned}.$$

$$\begin{aligned} \psi_2 :]-\pi, \pi[&\to U_1 = S^1 \setminus \{(-1,0)\} \\ t &\to (\cos(t), \sin(t)) \end{aligned}.$$

   Si verifica facilmente che ψ_1, ψ_2 sono continue, biettive, con inversa continua,
   La matrice Jacobiana di ψ_1 è

$$(J\psi_1) = \begin{pmatrix} -\sin(t) \\ \cos(t) \end{pmatrix}.$$

   matrice di un'applicazione lineare

$$\mathbb{R} \to \mathbb{R}^2.$$

   ha rango 1 $\forall t$ quindi $(d\psi_1)_t$ è iniettiva $\forall t$.
   Quindi la definizione è soddisfatta.

2. Sia $V \subseteq \mathbb{R}^m$ aperto. Sia $f : V \to \mathbb{R}$ C^∞
   il grafico di f in $\mathbb{R}^{m+1}$ è una varietà grafico immersa in $\mathbb{R}^{m+1}$ di dimensione m.
   Infatti $\Gamma = \{(x_1, \dots, x_m, f(x_1, \dots, x_n)) \mid (x_1, \dots, x_n) \in V\}$
   mettiamo la singola parametrizzazione

$$\begin{aligned} \psi : V &\to U = \Gamma \\ (x_1, \dots, x_m) &\to (x_1, \dots, x_m, f(x_1, \dots, x_m)) \end{aligned}.$$

   ψ è biettiva, continua, ψ^{-1} è la restrizione a Γ alle prime m coordinate, quindi ψ^{-1} è continua
   ψ è C^∞ perché lo sono le sue componenti.
   La matrice Jacobiana è IMMAGINE
   ha rango m quindi il differenziale è iniettiva.
   Esercizio
   Trovare parametrizzazione che rendano S^n una varietà differenzaibile immersa in $\mathbb{R}^{n+1}$ (Suggerisco di usare parametrizzazione come quella del grafico) **Esempio:**
   Nella definizione non è sufficiente richiedere ψcibtubya biettiva, C^∞, un differenziabile iniettivo in ogni punto. Cioè da queste ipotesi non segue ψ^{-1} continua

Lezione N+5 Geometria 2

Federico De Sisti

2025-05-27

0.1 Zenobobi

Definizione 1 (Parametrizzazione di Monge)
$f : V \to \mathbb{R}$ *differenziabile aperto di* $\mathbb{R}^{n-1} \Rightarrow \begin{array}{rl} \varphi : & V \to U = Im(\varphi) \\ & (a_1, \ldots, a_{n-1}) \to (a_1, \ldots, a_{n-1}, f) \end{array}$
èunaparametrizzazione.

Teorema 1
Sia $S \subseteq \mathbb{R}^3$
una superficie differenziabile immersa allora $\exists$ *una parametrizzazione di Monge per ogni punto di* S

Dimostrazione
$p \in S$
$\begin{array}{l} \psi : V \to U \\ \quad q \to p \end{array}$ *parametrizzazione*
$d\psi$ *è iniettivo,* $q = \psi^{-1}(p)$
ed è dato della matrice Jacobiana
GUARDA 17 25

$$\pi : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^2.$$

proiezione su (x, y)
$\pi \circ \psi$ *ha differenziale in* q *che è isomorfismo*
$\Rightarrow$ *a meno di restringere l'aperto* U *abbiamo* $\pi \circ \psi : U \to W = \pi(U)$ *invertibile con inversa* C^∞
INSERISCI IMMAGINE 5 28
Otteniamo la parametrizzazione di Mange definita da

$$\begin{array}{rl} \tilde{\psi} = & \psi \circ (\pi \circ \psi)^{-1} : W \to U \\ & (x, y) \to (x, y, f(x, y)) \end{array}.$$

È C^∞ *sui punti di* W *componibile con l'inversa della restrizione* $\pi|_U$ $\square$

0.2 Applicazioni differenziabile tra superfici

Definizione 2
1. *Sia* S *una superficie differenziabile*
   Una funzione $f : S \to \mathbb{R}$ *si dice differenziabile in* $x \in S$ *se* $\exists$ *un intorno coordinato* U *di* x *è carta* $\varphi : U \to V \subseteq \mathbb{R}^2$
   tale che $f \circ \varphi^{-1} : V \to \mathbb{R}$ *differenziabile in* $\varphi(x)$
   f *si dice differenziabile se è differenziabile in* $x \quad \forall x \in S$
2. $f : S \to \mathbb{R}^n$
   è differenziabile se lo sono tutte le sue componenti

3. *S_1, S_2 superfici differenziabili*
   $f : S_1 \to S_2$ *è differenziabile su* $x\S_1$ *se* $\exists \varphi : U \to V$ *carta locale intonro ad* x
   $\varphi' : U' \to V'$ *carta locale intorno ad* $f(x)$ *tale che* $\varphi' \circ f \circ \varphi^{-1} : V \to V'$ *è differenziabile*

4. $f : S_1 \to S_2$ *è un diffeomorfismo se è iniettivo, differenziabile e* $f^{-1} : S_2 \to S_1$ *è differenziabile*

Esempi

1. $\begin{aligned} f :& S \to \mathbb{R} \\ & \text{x} \to \|x-u\|^2 \text{ differenziabile} \end{aligned}$ $\mathrm{S}_1 = \{x^2+y^2+z^2 = 1\}$
   $S_2 = \{(x,y,z) \mid x^2+y^2 = 1\}$
   $\tilde{S}_1 = S_2 \setminus \{(0,0,1),(0,0,1)\}$
   $f : \tilde{S}_1 \to S_2$
   $(x,y,z) \to (\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}, \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}, z)$

Esercizio
Dimostrare che f è differenziabile
Suggerimento
usare la parametrizzazione

$$\begin{aligned} \psi :& V \to \tilde{S}_1 \\ & (\theta,\rho) \to (\cos(\rho)\cos(\theta), (\rho)\sin(\theta)\sin(\rho)) \end{aligned}.$$

$$\begin{aligned} \psi^{-1} :& V' \to S_2 \\ & (\theta,t) \to (\cos\theta, \sin\theta, t) \end{aligned}.$$

Sia $f : A \to \mathbb{R}^m$ differenziabile
A aperto di $\mathbb{R}^n$, $p \in A$
$d_p f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$ ed è definito
$v \to \mathcal{J} f_p \cdot v$, dove $\mathcal{J}$ è la Jacobiana
Sia $\alpha : I \to \mathbb{R}^n$ curva con $\alpha(t_0) = p$ e $\alpha'(t_0) = v$ per $t_0 \in I$
Allora $df_p(v) = \beta'(0)$
$\beta(t) = f(\alpha(t))$