

Analisi III

Paolo Bettelini

Contents

1	Successione di funzioni	1
2	Serie di funzioni	3
3	Integrazione	4

1 Successione di funzioni

Definizione Successione di funzioni

Una *successione di funzioni* è una famiglia di funzioni $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ definite su un dominio comune $f_n: D \rightarrow \mathbb{R}$.

Definizione Convergenza in un punto

Sia $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ una successione di funzioni. La successione converge in un punto x_0 se

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x_0) < \infty$$

Definizione Convergenza puntuale

Sia $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ una successione di funzioni. La successione *converge puntualmente* ad una funzione $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ se

$$\forall x \in D, \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$$

Quindi la successione converge in ogni punto, ma la velocità di convergenza può dipendere dal punto.

Definizione Convergenza uniforme

Sia $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ una successione di funzioni. La successione *converge uniformemente* ad una funzione $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ se

$$\sup_{x \in D} |f_n(x) - f(x)| \rightarrow 0$$

per $n \rightarrow \infty$.

Oppure possiamo dire che la condizione è che

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \mid \forall n > N, \|f_n - f\|_{\infty, E} < \varepsilon$$

Quindi la velocità di convergenza è la stessa in ogni punto. Ogni cosa che converge uniformemente converge puntualmente.

Definizione Convergenza uniformemente di Cauchy

Sia $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ una successione di funzioni. La successione è *uniformemente di Cauchy* se

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N} \mid \forall n, m > N, \sup_{x \in D} |f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon$$

A partire da un certo indice, tutte le funzioni della successione sono molto vicine tra loro in modo uniforme su tutto D , indipendentemente dalla funzione limite.

Teorema Convergenza uniforme e convergenza uniformemente di Cauchy

Sia $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ una successione di funzioni. Se la successione è uniformemente di Cauchy allora è uniformemente convergente.

Teorema

Sia $\{f_n\}$ convergente uniformemente a f in E e sia $x_0 \in E$ un punto di accumulazione di E . Supponiamo che esista

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) = \lambda_n$$

per ogni n , allora

1. $\lambda_n \rightarrow \lambda$,
- 2.

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lambda$$

Proof

1.

$$|\lambda_n - \lambda_m| = \lim_{x \rightarrow x_0} |f_n(x) - f_m(x)| \leq \lim_{x \rightarrow x_0} \|f_n - f_m\|_{\infty, E} < \varepsilon$$

dunque è di Cauchy e converge al limite $\lambda_n \rightarrow \lambda$.

2.

$$\begin{aligned} |f(x) - \lambda| &\leq |f(x) - f_n(x)| + |f_n(x) - \lambda_n| + |\lambda_n - \lambda| \\ &\leq \|f - f_n\|_{\infty, E} + |f_n(x) - \lambda_n| \end{aligned}$$

dunque se $\bar{n} = \max\{N_1, N_2\}$

$$|f(x) - \lambda| \leq 2\varepsilon + |f_{\bar{n}}(x) - \lambda_{\bar{n}}| \leq 3\varepsilon$$

quindi

$$f_{\bar{n}}(x) - \lambda_{\bar{n}} \leq \varepsilon$$

Quindi, se abbiamo convergenza uniforme,

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) &= \lim_{x \rightarrow x_0} \left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \right) \\ &= \lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) \right) \end{aligned}$$

possiamo scambiare l'ordine.

Corollario

Se f_n sono continue e $f_n \rightarrow f$, allora f è continua.

Teorema

Sia $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una successione di funzioni R-integrabili dove $f_n \rightarrow f$ in $[a, b]$. Allora f è R-integrabile e

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n(x) dx = \int_a^b \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) dx = \int_a^b f(x) dx$$

Proof

Supponiamo anche che f_n siano continue.

1. f è continua e quindi R-integrabile;
2. mostriamo che vale l'uguale, cioè $\forall m, n \geq N$,

$$\begin{aligned} \left| \int_a^b f_n(x) dx - \int_a^b f(x) dx \right| &\leq \int_a^b f_n(x) - f(x) dx \\ &\leq \int_a^b \|f_n - f\|_{\infty, [a, b]} dx \leq \varepsilon(b - a) \end{aligned}$$

(cioè tende a zero) per $n \geq N$.

Teorema

Sia $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una successione di funzioni derivabili. Supponiamo che:

1. $\exists x_0 \in [a, b]$ tale che f_n converge in x_0 ;
2. f'_n converge uniformemente in g a $[a, b]$.

Allora,

1. f_n converge uniformemente a f in $[a, b]$;
2. f è derivabile;
3. $f'(x) = g(x)$ per ogni $x \in [a, b]$.

2 Serie di funzioni

Definizione Convergenza uniforme

La serie di funzioni $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ converge uniformemente ad una funzione $S(x)$ se la successione delle somme parziali

$$S_N(x) = \sum_{n=1}^N f_n(x)$$

converge uniformemente a $S(x)$, ovvero se

$$\sup_{x \in D} |S_N(x) - S(x)| \rightarrow 0$$

per $N \rightarrow \infty$.

È più forte della convergenza puntuale.

Definizione Convergenza totale

Una serie di funzioni $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ converge totalmente su un insieme D se la serie di norme

$$\sum \|f_n\|_{\infty}$$

converge.

Ricordiamo che in generale la norma

$$\|f\|_p = \left(\int_a^b |f(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}}, \quad 1 \leq p < \infty$$

e per $p = \infty$ con f limitata

$$\|f\|_{\infty} = \sup_{x \in D} |f(x)|$$

che è un numero siccome f è limitata

3 Integrazione

Teorema Monotone convergence theorem for non-negative measurable functions

Let (X, Σ, μ) be a measurable space and let

$$f_n : X \rightarrow [0; +\infty)$$

be measurable such that $f_n \leq f_{n+1}$. Then,

$$\lim_n \int_X f_n d\mu = \int_X (\lim_n f_n) d\mu$$

Sia per esempio $f_n = \chi_{\{1\}} + \chi_{\{n\}}$. Allora la funzione converge puntualmente in quanto l'1 si sposta sempre più a destra. Abbiamo

$$\int_{\mathbb{N}} f_n d\mu = 2 \rightarrow 2$$

Se invece $f_n \geq f_{n+1}$ allora $f_n = \chi_{\{n, n+1, \dots\}}$, allora tende a zero. Tuttavia, l'integrale di f_n è infinito in quanto la misura dell'insieme è infinita.

Proof

Abbiamo

$$f_n \leq f_{n+1} \leq \dots \leq f, \quad f = \lim_n f_n$$

Quindi

$$\int_X f_n d\mu \leq \int_X f_{n+1} d\mu \leq \int_X f d\mu$$

quindi anche la successione degli integrali è monotona e ammette limite. Il limite sarà sempre più piccolo dell'ultimo valore.

$$\lim_n \int_X f_n d\mu \leq \int_X f d\mu$$

Facciamo ora il caso \geq . Sia $0 \leq \varphi \leq f$ una funzione semplice

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \alpha_i \chi_{E_i}, \quad \alpha_i \geq 0$$

e prendiamo $c \in (0, 1)$. Consideriamo gli insiemi

$$A_n = \{f_n \geq c\varphi\}$$

Tali insiemi sono misurabili, in quanto sto moltiplicando una funzione misurabile per una costante e l'insieme $\{f \geq g\}$ è come dire $\{f - g \geq 0\}$. Sappiamo

1. $A_n \subseteq A_{n+1}$ in quanto $c\varphi(x) \leq f_n(x) \leq f_{n+1}(x)$;
2. $\bigcup A_n = X$. Sia $x \in X$. Se $\varphi(x) = 0$ allora è in A_n . Se invece $\varphi(x) > 0$, ma siccome $\varphi \leq f$, e $c < 1$, allora

$$c\varphi(x) < \varphi(x) \leq f(x)$$

La successione, da un certo posto in poi, è più grande di $c\varphi(x)$ (ne basta uno), quindi $x \in A_n$. Osserviamo che

$$\begin{aligned} E_i &= E_i \cap X \\ &= E_i \cap \left(\bigcup A_n\right) \\ &= \bigcup_n (E_i \cap A_n) \end{aligned}$$

Quindi $E_i \cap A_n \subseteq E_i \cap A_{n+1}$ è una successione di insiemi che si sta allargando. Quindi, la misura dell'union è il limite.

$$\mu(E_i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(E_i \cap A_n)$$

Consideriamo

$$\begin{aligned} \int_X f_n d\mu &\geq \int_{A_n} f_n d\mu \geq c \int_{A_n} \varphi d\mu \\ &= c \int_X \varphi \chi_{A_n} d\mu = c \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu(E_i \cap A_n) \end{aligned}$$

Facciamo ora il limite

$$\begin{aligned} \lim_n \int_X f_n d\mu &\geq c \lim_n \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu(E_i \cap A_n) \\ &= c \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu(E_i) = c \int_X \varphi d\mu \end{aligned}$$

Abbiamo quindi ottenuto che

$$\lim_n \int_X f_n d\mu \geq c \int_X \varphi d\mu$$

vale per tutti i $c \in (0, 1)$, e allora possiamo usare il supremum

$$\lim_n \int_X f_n d\mu \geq \int_X \varphi d\mu$$

Non solo vale per ogni c , ma per ogni funzione semplice tale che $0 \leq \varphi \leq f$. In particolare anche per il supremum. Il supremum di questi integrali al variare di tutte le funzioni semplici minori di f è l'integrale di f , cioè la definizione

$$\lim_n \int_X f_n d\mu \geq \int_X f d\mu$$

Mettendo assieme le due cose otteniamo l'uguaglianza

$$\lim_n \int_X f_n d\mu = \int_X f d\mu$$

Corollario

Allora

$$\sum_{n=1}^{\infty} \int_X f_n d\mu = \int_X \sum_{n=1}^{\infty} f_n d\mu$$

Proof

Siccome i termini sono tutti positivi, la successione delle serie parziale è monotona.

Lemma Lemma di Fatou

Sia $f_n: X \rightarrow [0, +\infty)$ misurabili, allora

$$\int_X \liminf f_n d\mu \leq \liminf \int_X f_n d\mu$$

(l'integrale esiste sempre)

Proof

Consideriamo

$$g_n = \inf_{k \geq n} f_k$$

chiaramente $g_n \leq g_{n+1} \rightarrow \liminf f_n$ e sono misurabili. Consideriamo allora l'integrale

$$\lim \int_X g_n d\mu = \int_X \liminf f_n d\mu$$

e per il teorema della convergenza monotona e definizione di \liminf

$$\begin{aligned} \int_X \liminf f_n d\mu &= \lim_n \int_X (\inf_{k \geq n} f_k) d\mu \\ &\leq \liminf \int_X f_n d\mu \end{aligned}$$

Definizione Integrabilità di una funzione positiva

Sia $f: X \rightarrow [0; +\infty)$ misurabile. Allora f è *integrabile* su X se

$$\int_X f d\mu \leq \infty$$

Diciamo che $f \in L^1(\{X, \Sigma, \mu\})$. Per esempio $\{1/n^2\} \in L^1(\mathbb{N})$ ma $\{1/n\} \notin L^1(\mathbb{N})$

Definizione Integrabilità di una funzione

Sia $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ misurabile. Allora f è *integrabile* se f^+ e f^- sono integrabili (che sono entrambe funzioni positive).

Dobbiamo tuttavia definire l'integrale di una funzione di segno arbitraria. Sia allora

$$\int_X f d\mu = \int_X f^+ d\mu - \int_X f^- d\mu$$

Consideriamo per esempio

$$f = (1, -\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, -\frac{1}{4})$$

Allora

$$f^+ = (1, 0, \frac{1}{3}, 0)$$

e

$$f^- = (0, \frac{1}{2}, 0, \frac{1}{4})$$

L'integrale non converge in quanto i due integrali non convergono (le serie divergono per confronto asintotico).

Proposition

Siano $f, g \in L^1$.

1. $\alpha f + \beta g \in L^1$ e

$$\int_X (\alpha f + \beta g) d\mu = \alpha \int_X f d\mu + \beta \int_X g d\mu$$

Quindi lo spazio delle funzioni integrabili è uno spazio vettoriale.

- 2.

$$f \leq g \implies \int_X f d\mu \leq \int_X g d\mu$$

3. $f \in L^1 \iff |f| \in L^1$. Infatti $f^+ f^- = |f|$ e per la direzione inversa abbiamo $0 \leq f^+ \leq |f|$. Ma se l'integrale del modulo è finito allora lo sarà anche quello di f^+ che è più piccolo. Lo stesso vale per la parte negativa.
4. Se f è misurabile allora lo è anche $|f|$, ma il viceversa non è vero. Per esempio sia $X = \{a, b, c\}$ e $\Sigma = \{X, \emptyset, \{a\}, \{b, c\}\}$. Sia allora

$$f = \begin{cases} 1 & x = a \vee x = b \\ -1 & x = c \end{cases}$$

Chiaramente $\{f < 0\} = \{c\}$ non è misurabile, ma $|f| = 1$ per tutte le x e le funzioni costanti sono sempre misurabili.

- 5.

$$\left| \int_X f d\mu \right| \leq \int_X |f| d\mu$$

Infatti

$$\begin{aligned} \left| \int_X (f^+ - f^-) d\mu \right| &= \left| \int_X f^+ d\mu - \int_X f^- d\mu \right| \\ &\leq \left| \int_X f^+ d\mu \right| + \left| \int_X f^- d\mu \right| \\ &= \int_X f^+ d\mu + \int_X f^- d\mu \\ &= \int_X (f^+ + f^-) d\mu \\ &= \int_X |f| d\mu \end{aligned}$$

Teorema Teorema della convergenza dominante

Sia $f_n: X \rightarrow \mathbb{R}$ misurabile e sia $f = \lim_n f_n$. Supponiamo che ci sia $g \in L^1$ tale che $|f_n| \leq g$ in X . Allora

$$\lim_n \int_X f_n d\mu = \int_X f d\mu$$

Proof

f_n sono integrabili in quanto $|f_n| \leq g$ che è integrabili, quindi sarà finito anche l'integrale del modulo, e f è integrabile perché ciò vale anche per il limite. Allora $|f - f_n| \leq 2g$ quindi $2g - |f - f_n| \geq 0$. Siccome quest'ultima è una successione positiva posso applicare il lemma di Fatou

$$\int_X \liminf (2g - |f - f_n|) d\mu \leq \liminf \int_X (2g - |f - f_n|) d\mu$$

Ma per le proprietà dei \liminf possiamo estrarre la costante

$$\begin{aligned} \int_X 2g - \lim |f - f_n| &= \int_X 2g \\ &\leq \liminf \left(\int_X 2g d\mu - \int_X |f - f_n| d\mu \right) \\ &= \int_X 2g d\mu - \limsup \int_X |f - f_n| d\mu \end{aligned}$$

Abbiamo quindi

$$\begin{aligned} \int_X 2g d\mu &\leq \int_X 2g d\mu - \limsup \int_X |f - f_n| d\mu \\ \limsup \int_X |f - f_n| d\mu &\leq 0 \end{aligned}$$

Ma quindi questo limite deve essere ed essere uguale a zero

$$\int_X |f - f_n| d\mu = 0$$

Infine, usando il modulo

$$\lim \left| \int_X f_n d\mu - \int_X f d\mu \right| \leq \lim \int_X |f_n - f| d\mu = 0$$

siccome è tutto positivo deve essere

$$\lim \left| \int_X f_n d\mu - \int_X f d\mu \right| = 0$$

Se $A \subset X$ con A integrabile e $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ misurabile, f è integrabile in A se $f\chi_A$ è integrabile. Chiaramente definiamo

$$\int_A f d\mu = \int_X f\chi_A d\mu$$

Quindi per vedere se è integrabile nel sottoinsieme la estendiamo su tutto lo spazio con la funzione caratteristica e integriamo.

Costruiamo ora una misura su \mathbb{R} (la misura di Lebesgue). Vogliamo che sia invariante per traslazione $\mu(A) = \mu(A + c)$ dove c è una costante. Vorremmo anche che $\mu([b, a]) = b - a$. Tuttavia, non è possibile costruire tale misura su tutto \mathbb{R} . Sia allora $I = (a, b)$ (non cambia se incluso o meno) e denotiamo $l(I) = b - a$. Sia anche $E \subset \mathbb{R}$. Diamo la *misura esterna*

$$\mu^*(E) = \inf \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} l(I_n) \mid E \subset \bigcup_n I_n \right\}$$

Alcune proprietà di questa ipotetica misura

1. $\mu^*(\emptyset) = 0$;

2. $\mu^*(\{x\}) = 0$ dove $\{x\} \subset (x - \varepsilon, x + \varepsilon)$;

3. se E numerabile, allora $\mu^*(E) = 0$

$$\begin{aligned} E &\subset \{x_n\} \\ I_n &= \left(x_n - \frac{\varepsilon}{2^n}, x_n + \frac{\varepsilon}{2^n}\right) \\ E &\subset \bigcup I_n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} l(I_n) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2^{n-1}} \\ &= \varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^n} = 2\varepsilon \end{aligned}$$

4. $\mu^*(E + x) = \mu^*(E)$ (invariante per traslazione).

5. subadditività

$$\mu^*\left(\bigcup E_n\right) \leq \sum_n \mu(E_n)$$

6. $\mu^*(I) = b - a$

Se tutto fosse vero, abbiamo quello che cerchiamo, ma in realtà quando gli insiemi sono disgiunti l'ugualianza non vale, quindi non esiste tale misura.

Vale sempre $\mu^*(I) \leq b - a$ perché c'è l'inf, c'è sempre un ricoprimento. La misura esterna è almeno quel valore, magari più piccolo, vale lo stesso.