

# Complementi di analisi funzionale

De Donato Paolo

20 gennaio 2019

## 1 La chiusura della palla aperta

In uno spazio metrico generico valgono le disuguaglianze

$$B_r(x) \subseteq \overline{B_r(x)} \subseteq D_r(x)$$

queste inclusioni possono essere sia disuguaglianze strette sia uguaglianze tra insiemi. Preso un qualunque insieme  $S$  contenente almeno due elementi distinti possiamo sempre dotarlo della seguente metrica

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

La topologia indotta da tale metrica rende tutti i singleton aperti e quindi ogni sottoinsieme di  $S$  è sia aperto che chiuso. Fissato  $x \in S$  segue che

$$\{x\} = B_1(x) = \overline{B_1(x)} \subsetneq D_1(x) = S$$

Su uno spazio vettoriale normato  $X \neq \{0\}$  invece si ha sempre  $B_r(x) \subsetneq \overline{B_r(x)} = D_r(x)$ , infatti possiamo sempre trovare vettori di norma arbitraria e per ogni  $y \in D_r(x)$  la successione

$$x_n = \frac{1}{n}x + \left(1 - \frac{1}{n}\right)y$$

è contenuta in  $B_r(x)$  e converge a  $y$ , quindi per una proposizione precedente  $\overline{B_r(x)} = D_r(x)$ .

## 2 Esempi notevoli di spazi vettoriali topologici

### 2.1 Lo spazio $L^1_{loc}$

Diamo un esempio di spazio vettoriale topologico localmente convesso usato ampiamente nei corsi di analisi avanzata.

Innanzitutto fissiamo  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$  insieme aperto non vuoto e definiamo

$$L^1_{loc}(\Omega, \mathbb{R}^m) = \left\{ f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^m \text{ misurabile} : \int_K \|f(x)\| dx < +\infty \forall K \subseteq \Omega \text{ compatto in } \mathbb{R}^n \right\}$$

che come è ben noto risulta essere uno spazio vettoriale reale. Siano ora  $f_n, f \in L^1_{loc}(\Omega, \mathbb{R}^m)$  diciamo che la successione converge a  $f$  se e solo se

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_K \|f_n(x) - f(x)\| dx = 0$$

per ogni  $K \subseteq \Omega$  compatto. Quindi denotando con  $\mathcal{K} = \{K \subseteq \Omega : K \text{ compatto in } \mathbb{R}^n\}$  la famiglia di seminorme

$$\{p_K(f)\}_{K \in \mathcal{K}} = \left\{ \int_K \|f(x)\| dx \right\}_{K \in \mathcal{K}}$$

rende  $L^1_{loc}(\Omega, \mathbb{R}^m)$  uno spazio vettoriale topologico localmente convesso come ben sappiamo in cui la convergenza di successioni coincide con la precedente definizione di convergenza.

Tale famiglia di seminorme non risulta totale, se però identifichiamo le funzioni che coincidono quasi ovunque allora tale famiglia risulta anche totale. Sia infatti  $f$  tale che l'insieme  $\{x \in \Omega : f(x) \neq 0\}$  abbia misura non nulla (altrimenti coinciderebbe con la funzione nulla) allora da una conseguenza del teorema di rappresentazione di Riesz esisterà un compatto  $K$  contenuto in tale insieme con misura strettamente maggiore di 0 e quindi  $\int_K \|f(x)\| dx > 0$ .

Quindi il limite di una successione convergente in  $L^1_{loc}$  se esiste è unico.

## 2.2 Lo spazio delle funzioni test

Prendiamo  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$  aperto e denotiamo con  $C_c^\infty(\Omega, \mathbb{R}^m)$  lo spazio di tutte le funzioni  $\phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  derivabili infinite volte su  $\mathbb{R}^n$  tali che l'insieme

$$\text{supp } \phi = \overline{\{x \in \mathbb{R}^n : \phi(x) \neq 0\}}$$

detto *supporto* di  $\phi$  se non vuoto è compatto e contenuto in  $\Omega$ . È chiaramente uno spazio vettoriale detto *spazio delle funzioni test*.

Sia ora  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \in \mathbb{N}_0^n$  e  $|\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n$  allora poniamo per comodità di notazione

$$D^\alpha \phi(x) = \phi(x) \text{ se } |\alpha| = 0$$

$$D^\alpha \phi(x) = \frac{\partial^{|\alpha|} \phi}{\partial x_1^{\alpha_1} \partial x_2^{\alpha_2} \dots \partial x_n^{\alpha_n}}(x) \text{ altrimenti}$$

Possiamo definire su  $C_c^\infty(\Omega, \mathbb{R}^m)$  la seguente famiglia di seminorme

$$\{p_\alpha(\phi)\}_{\alpha \in \mathbb{N}_0^n} = \left\{ \max_{x \in \mathbb{R}^n} \|D^\alpha \phi(x)\| \right\}_{\alpha \in \mathbb{N}_0^n}$$

che rende lo spazio delle funzioni test uno spazio vettoriale topologico localmente convesso. Con questa topologia diciamo che una successione  $\phi_k$  converge a  $\phi$  in  $C_c^\infty(\Omega, \mathbb{R}^m)$  se e solo se per ogni multiindice  $\alpha$  la successione  $D^\alpha \phi_k$  converge uniformemente a  $D^\alpha \phi$  riottenendo così la definizione usuale di convergenza delle funzioni test.

## 3 Cenni alle equazioni differenziali ellittiche

In questa sezione applicheremo tutti i risultati ottenuti precedentemente per studiare una particolare classe di operatori differenziali chiamati *ellittici* sugli spazi  $L^p$  e in particolar modo su  $L^2$ .

Si richiede che il lettore sia già a conoscenza delle principali proprietà degli spazi  $L^p$  e  $W^{k,p}$ , in particolare si ricorda che per ogni  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $k \in \mathbb{N}$  e  $p \in [1, +\infty]$  gli spazi  $L^p(\Omega)$  e  $W^{k,p}(\Omega)$  sono spazi di Banach mentre  $L^2(\Omega)$  e  $W^{k,2}(\Omega)$  sono spazi di Hilbert, mentre se  $p \in ]1, +\infty[$  allora  $L^p(\Omega)$  è riflessivo con spazio duale

$$(L^p)^* = L^{\frac{p}{p-1}}$$

Fissiamo  $\Omega$  aperto limitato di  $\mathbb{R}^n$ ,  $A : \Omega \rightarrow M_n$  dove  $M_n = \mathbb{R}^{n^2}$  è lo spazio delle matrici quadrate di ordine  $n$ ,  $b : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $c : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  ed  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  funzioni generiche. Fissiamo anche  $u_0 : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}$  di classe  $C^1$  su  $\Omega$ , vogliamo trovare tutte le funzioni  $u : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}$  di classe  $C^2$  su  $\Omega$  tali che

$$\begin{cases} -\operatorname{div}(A \cdot \nabla u) + b \cdot \nabla u + cu = f & \text{su } \Omega \\ u = u_0 & \text{su } \partial\Omega \end{cases}$$

**Definizione 3.1.** L'applicazione  $A : \Omega \rightarrow M_n$  è detta *uniformemente ellittica* se e solo se esiste una costante  $m > 0$  tale che per ogni  $\lambda \in \mathbb{R}^n$  e  $x \in \Omega$  vale la disuguaglianza

$$(A(x) \cdot \lambda) \cdot \lambda = \sum_{i,j=1}^n a_{i,j}(x) \lambda_j \lambda_i \geq m \|\lambda\|^2$$

dove  $a_{i,j}$  è l'elemento di  $A$  in corrispondenza della  $i$ -esima riga e della  $j$ -esima colonna.

Un'equazione differenziale nella forma precedente è detta *uniformemente ellittica* se lo è la matrice dei coefficienti  $A$ .

Osserviamo che sotto particolari condizioni sui coefficienti possiamo integrare ambo i coefficienti e utilizzare la formula di integrazione per parti e per ogni  $v \in C_c^1(\Omega)$  l'espressione precedente diviene

$$\int_{\Omega} (A \nabla u) \cdot \nabla v dx + \int_{\Omega} (b \cdot \nabla u) v dx + \int_{\Omega} c u v dx = \int_{\Omega} f v dx$$

che continua a valere anche se  $u$  possiede solamente le derivate prime continue.

Supponiamo adesso che  $A, b, c \in L^\infty(\Omega)$  e  $f \in L^2(\Omega)$ , allora nella formula precedente possiamo indebolire le condizioni su  $u$  e  $v$  supponendo che appartengono rispettivamente a  $W^{1,2}$  e  $W_0^{1,2}$ . Dobbiamo ora dare un significato all'espressione  $u = u_0$  sul bordo di  $\Omega$  in quanto esso possiede misura nulla e le funzioni di Sobolev sono definite quasi ovunque e quindi l'espressione così com'è perderebbe di significato.

Tornando al caso delle funzioni  $C^1$   $u - u_0$  si annulla sul bordo di  $\Omega$  quindi è approssimabile tramite funzioni  $C_c^1(\Omega)$ , perciò nel caso di funzioni di Sobolev questo equivale a dire che  $u - u_0 \in W_0^{1,2}(\Omega)$ .

**Definizione 3.2.** Nelle stesse ipotesi definite precedentemente una funzione  $u \in W^{1,2}(\Omega)$  è *soluzione debole* dell'equazione differenziale ellittica se e solo se  $u - u_0 \in W_0^{1,2}$  e per ogni  $v \in W_0^{1,2}(\Omega)$  vale

$$\int_{\Omega} (A \nabla u) \cdot \nabla v dx + \int_{\Omega} (b \cdot \nabla u) v dx + \int_{\Omega} c u v dx = \int_{\Omega} f v dx$$

È facile dimostrare che per ogni  $u \in u_0 + W_0^{1,2}(\Omega)$  vale l'uguaglianza

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} [A \nabla (u - u_0)] \cdot \nabla v dx + \int_{\Omega} [b \cdot \nabla (u - u_0)] v dx + \int_{\Omega} c (u - u_0) v dx \\ = \int_{\Omega} f v dx - \int_{\Omega} (A \nabla u_0) \cdot \nabla v dx - \int_{\Omega} (b \cdot \nabla u_0) v dx - \int_{\Omega} c u_0 v dx \end{aligned}$$

posto allora per ogni  $v, w \in W_0^{1,2}$

$$\begin{aligned} B[v, w] &= \int_{\Omega} [A \nabla v] \cdot \nabla w dx + \int_{\Omega} (b \cdot \nabla v) w dx + \int_{\Omega} c v w dx \\ \tilde{f}(v) &= \int_{\Omega} f v dx - \int_{\Omega} (A \nabla u_0) \cdot \nabla v dx - \int_{\Omega} (b \cdot \nabla u_0) v dx - \int_{\Omega} c u_0 v dx \end{aligned}$$

possiamo riscrivere l'equazione differenziale nella forma più compatta

$$B[u - u_0, v] = \tilde{f}(v) \text{ per ogni } v \in W_0^{1,2}(\Omega)$$

Le applicazioni  $u \rightarrow B[v, u]$  e  $u \rightarrow \tilde{f}(u)$  sono lineari e continue per la limitatezza essenziale dei coefficienti, quindi  $\tilde{f}$  appartiene al duale di  $W_0^{1,2}$  e possiamo anche costruire un operatore lineare  $L$  che ad ogni  $u \in W_0^{1,2}$  associa il funzionale lineare  $(Lu)(v) = B[u, v]$ .

D'ora in poi useremo  $u \in W_0^{1,2}$  al posto di  $u - u_0$ , in quanto alla soluzione così ottenuta aggiungendo  $u_0$  otteniamo la soluzione dell'equazione originaria.

**Teorema 3.3** (Stime energetiche). *Se  $B$  è una forma uniformemente ellittica (ovvero  $A$  è uniformemente ellittica) allora esistono delle costanti  $\alpha, \beta > 0$  e  $\gamma \geq 0$  tali che*

$$\gamma = \frac{\|b\|_\infty^2}{2m} + |c^-|_\infty$$

$$|B[u, v]| \leq \alpha \|u\|_{W_0^{1,2}} \|v\|_{W_0^{1,2}}$$

$$\beta \|u\|_{W_0^{1,2}}^2 \leq B[u, u] + \gamma \|u\|_2^2$$

**Teorema 3.4** (Primo teorema di esistenza). *Nelle stesse ipotesi dei ragionamenti precedenti per ogni  $\mu \geq \gamma$  l'equazione*

$$Lu + \mu \tilde{u} = \tilde{f}$$

*possiede per ogni  $f \in L^2$  come unica soluzione  $Tf \in W_0^{1,2}$  con  $T$  ottenuto a partire da  $B_\mu[u, v]$ .*

**Proposizione 3.5.** *Se per quasi ogni  $x \in \Omega$  vale la disuguaglianza*

$$c(x) \geq \frac{\|b\|_\infty^2}{2m}$$

*allora l'equazione  $Lu = \tilde{f}$  ammette un'unica soluzione.*

*Dimostrazione.* Poniamo  $d(x) = c(x) - \frac{\|b\|_\infty^2}{2m}$  e

$$C[f, g] = \int_\Omega (A \nabla f) \cdot \nabla g dx + \int_\Omega (b \cdot \nabla f) g dx + \int_\Omega df g dx$$

allora  $C_\gamma[u, v] = B[u, v]$  e la tesi è così dimostrata. ■

Come conseguenza di questo teorema la forma bilineare

$$B_\gamma[u, v] = B[u, v] + \gamma \int_\Omega uv dx$$

è continua e coerciva. Da Lax-Milgram esisterà un'applicazione  $C : L^2 \rightarrow W_0^{1,2}$  tale che

$$\tilde{f}(u) = B_\gamma[Cf, u]$$

Per ogni  $f \in L^2$  e  $v \in W_0^{1,2}$  sia

$$\hat{f}(v) = \int_\Omega f v dx = \tilde{f} - \tilde{0}$$

e quindi  $\hat{f}(u) = B_\gamma[Cf, u] - B_\gamma[C0, u] = B_\gamma[Tf, u]$  dove  $Tf = Cf - C0$ .

È immediato constatare la linearità di  $T$ , dimostriamone allora la continuità:

$$\beta \|Tf\|_{W^{1,2}}^2 \leq B_\gamma[Tf, Tf] = \left| \int_{\Omega} fTf dx \right| \leq \|f\|_2 \|Tf\|_{W^{1,2}}$$

Ora dal teorema di compattezza se estendiamo il codominio di  $T$  a tutto  $L^2$  la nuova applicazione non solo è continua ma è addirittura un operatore compatto. Ricordiamo che dalla coercività di  $B_\gamma$  segue che  $B_\gamma[u, u] = 0 \Leftrightarrow u = 0$  e quindi

$$\begin{aligned} Lu = \tilde{f} &\Leftrightarrow B_\gamma[u, v] = \tilde{f}(v) + \gamma \hat{u}(v) = B_\gamma[Cf + \gamma Tu, v] \\ &\Leftrightarrow u = Cf + \gamma Tu \Leftrightarrow (I - \gamma T)(u) = Cf \end{aligned}$$

e  $I - \gamma T$  è un operatore di Riesz. Dal teorema dell'alternativa  $I - \gamma T$  è suriettivo se e solo se iniettivo (e quindi la soluzione esiste ed è unica) e quindi l'equazione

$$Lu = 0$$

ha solo e soltanto la soluzione identicamente nulla. Abbiamo così dimostrato il seguente teorema

**Teorema 3.6** (Secondo teorema di esistenza). *Sia  $f \in L^2$ , allora  $Lu = \tilde{f}$  ha un'unica soluzione se e solo se  $Lu = 0$  ha come soluzione solamente la funzione nulla.*

*Le soluzioni dell'equazione  $Lu = 0$  formano sempre uno spazio vettoriale di dimensione finita.*

*Dimostrazione.* Segue immediatamente dal teorema dell'alternativa di Fredholm. ■

**Teorema 3.7** (Terzo teorema di esistenza). *Definiamo  $\Sigma$  come insieme di tutti i  $\lambda \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$  tali che l'equazione  $Lu = \lambda \hat{u}$  ha una soluzione non nulla. Fissato  $f \in L^2$  e  $\lambda \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$  e l'equazione*

$$Lu = \lambda \hat{u} + \tilde{f}$$

*Sono allora verificate le seguenti asserzioni:*

1. *L'equazione ha un'unica soluzione se e solo se  $\lambda \notin \Sigma$ ;*
2.  *$\Sigma$  è finito o coincide con una successione crescente tendente a  $+\infty$ .*

*Dimostrazione.* Da primo teorema di esistenza segue che  $\Sigma \subseteq ]-\gamma, +\infty[$  e dal secondo teorema di esistenza segue immediatamente la prima asserzione, mentre dalla proposizione 5.5.6 segue che  $Lu = \lambda \hat{u} + \tilde{f}$  ha un'unica soluzione se e solo se  $\left(\frac{1}{\lambda + \gamma}I - T\right)$  è biiettivo ovvero iniettivo e quindi se  $\frac{1}{\lambda + \gamma}$  non si trova nello spettro puntuale di  $T$ . Quindi se non è finito  $\frac{1}{\lambda_n + \gamma}$  deve necessariamente tendere a 0 e la dimostrazione è così conclusa. ■