Calcolo delle Variazioni
a.a. 2019-2020

Simone Secchi
simone.secchi@unimib.it

http://elearning.unimib.it

Prerequisiti e strumenti

- Calcolo differenziale in spazi euclidei di dimensione finita
- Teoria della misura e dell'integrazione secondo Lebesgue
- Principi di Analisi Funzionale Lineare
- Teoria elementare degli spazi di Sobolev (almeno il caso hilbertiano $p = 2$)

Strumenti: il calcolo differenziale in dimensione infinita

Notazione. Se X è uno spazio di Banach (reale), il suo duale topologico sarà denotato con il simbolo X^*. Se $A \in X^*$, il simbolo $A[v]$ indicherà il valore di A nel punto v; talvolta semplificheremo la notazione e scriveremo Av al posto di $A[v]$.

Definizione. Siano X uno spazio di Banach, e $U \subset X$ un suo aperto. Un funzionale su U è un'applicazione $I\colon U \to \mathbb{R}$. Si noti che i "nostri" funzionali **non** sono necessariamente **lineari**!

Definizione. Sia $I\colon U \to \mathbb{R}$ un funzionale. Diremo che I è derivabile secondo Fréchet nel punto $u \in U$ se esiste un elemento $A \in X^*$ tale che

$$\lim_{\|v\|\to 0} \frac{I(u+v) - I(u) - Av}{\|v\|} = 0, \tag{1}$$

o, equivalentemente, se

$$I(u+v) = I(u) + Av + o(\|v\|) \quad \text{per } v \to 0.$$

Si osservi che questa è la definizione di funzione differenziabile quando $X = \mathbb{R}^n$.

Lemma. Se I è derivabile nel punto $u \in U$, allora l'elemento A che soddisfa (1) è univocamente determinato.

Dim. Infatti, supponiamo che A e B siano due elementi di X^* che soddisfano (1). Per sottrazione,

$$\lim_{\|v\|\to 0} \frac{(A-B)v}{\|v\|} = 0.$$

Fissiamo $u \in X$ con $\|u\| = 1$, e scegliamo $v = tu$, $t \to 0^+$. Allora

$$(A-B)u = \lim_{t\to 0+} \frac{t(A-B)u}{t\|u\|} = 0.$$

Per l'arbitrarietà di u, concludiamo che $A = B$.

Definizione. Se I è un funzionale derivabile secondo Fréchet nel punto $u \in U$, la derivata (talvolta: il differenziale) di Fréchet di I in u è l'unico elemento $I'(u) \in X^*$ (talvolta: $dI(u)$) tale che

$$I(u+v) = I(u) + I'(u)[v] + o(\|v\|)$$

per $v \to 0$.

Definizione. Se $I \colon U \to \mathbb{R}$ è derivabile secondo Fréchet in ogni punto $u \in U$, diremo che I è Fréchet-derivabile in U. La derivata di Fréchet di I è allora la mappa $I' \colon U \to X^*$ che ad $u \in U$ associa $I'(u) \in X^*$. Si tratta — in generale — di una mappa *non lineare*.

Se I' è una mappa continua da U in X^*, diremo che $I \in C^1(U)$.

Il caso hilbertiano

Se H è uno spazio di Hilbert (reale), è noto che gli elementi del duale H^* sono isometricamente identificati con vettori di H attraverso l'isomorfismo di Riesz. In particolare, un funzionale I definito su $U \subset H$ è derivabile in $u \in U$ se e solo esiste un vettore, detto d'ora in poi *gradiente* di I in u e denotato $\nabla I(u)$, tale che

$$I(u + v) = I(u) + \langle \nabla I(u) \mid v \rangle + o(\|v\|)$$

per $v \to 0$.

Proposizione. Siano I e J due funzionali derivabili nel punto $u \in X$. Allora valgono le seguenti affermazioni.

1. Se a e b sono numeri reali, allora $aI + bJ$ è derivabile in u, e vale $(aI + bJ)'(u) = aI'(u) + bJ'(u)$.

2. Il prodotto IJ è derivabile in u, e vale $(IJ)'(u) = J(u)I'(u) + I(u)J'(u)$.

3. Se $\gamma\colon \mathbb{R} \to U$ è una curva derivabile in t_0 e $u = \gamma(t_0)$, allora la composizione $\eta\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ definita da $\eta(t) = I(\gamma(t))$ è derivabile in t_0, e vale $\eta'(t_0) = I'(u)[\gamma'(t_0)]$.

4. Se $A \subset R$ è un aperto, $f\colon A \to R$ è derivabile in $I(u) \in A$, allora la composizione $K(u) = f(I(u))$ è definita in un intorno V di u, è derivabile in u e vale $K'(u) = f'(I(u))I'(u)$.

Dim. La prima affermazione è banale (esercizio!). Per quanto riguarda la seconda, quando $v \to 0$ in X, abbiamo

$$\begin{aligned}
I(u+v)J(u+v) &= \left(I(u) + I'(u)[v] + o(\|v\|)\right)\left(J(u) + J'(u)[v] + o(\|v\|)\right) \\
&= I(u)J(u) + J(u)I'(u)[v] + I(u)J'(u)[v] + I'(u)[v]J'(u)[v] \\
&\quad + o(\|v\|)\left(I(u) + I'(u)[v] + J(u) + J'(u)[v] + o(\|v\|)\right).
\end{aligned}$$

Concludiamo osservando che

$$I'(u)[v]J'(u)[v] + o(\|v\|)\left(I(u) + I'(u)[v] + J(u) + J'(u)[v] + o(\|v\|)\right)$$

è $o(\|v\|)$ per $v \to 0$. La terza affermazione è simile, infatti per $h \to 0$ in $\mathbb{R}$

$$\begin{aligned}
\eta(t_0+h) &= I(\gamma(t_0+h)) = I(\gamma(t_0) + \gamma'(t_0)h + o(|h|)) \\
&= I(u) + I'(u)[\gamma'(t_0)h + o(|h|)] + o(\|\gamma'(t_0)h + o(|h|)\|) \\
&= \eta(t_0) + I'(u)[\gamma'(t_0)h] + I'(u)[o(|h|)] + o(\|\gamma'(t_0)h + o(|h|)\|).
\end{aligned}$$

Poiché gli ultimi due addendi sono $o(|h|)$, otteniamo che

$$\eta(t_0+h) = \eta(t_0) + I'(u)[\gamma'(t_0)h] + o(|h|).$$

Infine, quando $v \to 0$ in X, si verifica come prima che

$$\begin{aligned} K(u+v) &= f(I(u+v)) = f(I(u) + I'(u)[v] + o(\|v\|)) \\ &= f(I(u)) + f'(I(u))(I'(u)[v] + o(\|v\|)) + o(I'(u)[v] + o(\|v\|)) \\ &= f(I(u)) + f'(I(u))I'(u)[v] + o(\|v\|). \end{aligned}$$

Osservazione. È possibile introdurre il concetto di derivata per applicazioni tra due spazi di Banach X e Y. Solo in questo contesto può essere enunciata una formulazione completa della regola di derivazione delle funzioni composte.

Poiché non ne faremo uso in queste lezioni, rimandiamo al testo di Ambrosetti e Prodi per ulteriori approfondimenti.

Definizione. Sia I un funzionale definito nell'aperto U di X, e sia $u \in U$. Diremo che I è derivabile secondo Gâteaux in u se esiste un elemento $A \in X^*$ tale che

$$\lim_{t \to 0} \frac{I(u + tv) - I(u)}{t} = Av \tag{2}$$

per ogni $v \in X$. In tal caso, l'unico (esercizio!) elemento siffatto prende il nome di derivata secondo Gâteaux di I in u, e si denota con $I'_G(u)$ o con $d_G I(u)$.

Osserviamo che questa nuova derivata riprende la cosiddetta *derivata direzionale* già nota nell'ambito del calcolo differenziale in dimensione finita.

In particolare, ricordando i "soliti" esempi in $\mathbb{R}^2$, deduciamo che esistono funzionali (non lineari) derivabili secondo Gâteaux ma non derivabili secondo Fréchet.

Condizione sufficiente per la derivabilità secondo Fréchet

Proposizione. Supponiamo che $U \subset X$ sia un aperto, che I sia Gâteaux-derivabile in U, e che I'_G sia continua in un punto $u \in U$. Allora I è Fréchet-derivabile in u, e (ovviamente) $I'(u) = I'_G(u)$.

Omettiamo la dimostrazione, che è probabilmente stata proposta nel caso $X = \mathbb{R}^2$ nel corso di Analisi Matematica 2.

Punti critici

Definizione. Siano X uno spazio di Banach, U un aperto di X, e I un funzionale definito su U. Diremo che $u \in U$ è un punto critico di I se I è derivabile in u e

$$I'(u) = 0.$$

Più esplicitamente, questo significa che $I'(u)[v] = 0$ per ogni $v \in X$.

Se u è un punto critico di I e $I(u) = c$, diremo che u è un punto critico (di I) al livello c. Se, per qualche $c \in \mathbb{R}$, l'insieme $I^{-1}(\{c\}) \subset X$ contiene almeno un elemento, diremo che c è un valore critico per I.

L'equazione $I'(u) = 0$ è nota come equazione di Eulero (o di Eulero-Lagrange) associata al funzionale I.

Esempi

Esempio 1. Ogni $A \in X^*$ è derivabile. Infatti, basta scrivere

$$A[u+v] = Au + Av$$

per dedurre che $A'(u) = A$ per qualsiasi $u \in X$.

Esempio 2. Sia X uno spazio di Banach, e sia $a\colon X \times X \to \mathbb{R}$ una forma bilineare continua. Denotiamo con $J\colon X \to \mathbb{R}$ il funzionale definito da $J(u) = a(u, u)$ per ogni $u \in X$. Allora J è derivabile in X. Infatti

$$\begin{aligned} J(u+v) &= a(u+v, u+v) = a(u, u) + a(u, v) + a(v, u) + a(v, v) \\ &= J(u) + a(u, u) + a(u, v) + a(v, u) + a(v, v). \end{aligned}$$

Poiché $|a(v, v)| \leq M\|v\|^2$ per l'ipotesi di continuità di a come forma bilineare, deduciamo che $a(v, v) = o(\|v\|)$ per $v \to 0$, e dunque che

$$J'(u)[v] = a(u, v) + a(v, u).$$

Esempio 3. (esercizio) Sia H uno spazio di Hilbert con norma $\|\cdot\|$. Il funzionale $J(u) = \|u\|$ è derivabile in ogni punto $u \neq 0$, e risulta

$$\nabla J(u) = \frac{u}{\|u\|}.$$

Esempio 4. Sia X uno spazio di Banach, e siano I, J due funzionali derivabili in X. Definiamo

$$Q(u) = \frac{I(u)}{J(u)}$$

sul sottoinsieme (aperto) $\{u \in X \mid J(u) \neq 0\}$. Per la Proposizione sulle regole di calcolo dimostrata sopra, possiamo affermare che Q è derivabile e che

$$Q'(u) = \frac{J(u)I'(u)[v] - I(u)J'(u)[v]}{J(u)^2}$$

per ogni $u\ inX$ tale che $J(u) \neq 0$.

Esempi in spazi concreti

Esempio 5. Sia $\Omega \subset \mathbb{R}^N$, $N \geq 1$, un insieme aperto e limitato. Definiamo i funzionali

$$I\colon L^2(\Omega) \to \mathbb{R}, \quad I(u) = \int_\Omega |u(x)|^2\, dx,$$

$$J\colon H_0^1(\Omega) \to \mathbb{R}, \quad J(u) = \int_\Omega |\nabla u(x)|^2\, dx,$$

$$K\colon H^1(\Omega) \to \mathbb{R}, \quad K(u) = \int_\Omega |\nabla u(x)|^2\, dx,$$

$$L\colon H^1(\Omega) \to \mathbb{R}, \quad L(u) = \int_\Omega |\nabla u(x)|^2\, dx + \int_\Omega |u(x)|^2\, dx.$$

Trattandosi di forme quadratiche associate a forme bilineari continue, sappiamo già che i quattro funzionali sono derivabili.

Esplicitamente, valgono le relazioni

$$\nabla I(u) = 2u$$
$$\nabla L(u) = 2u$$
$$\nabla J(u) = 2u.$$

Un calcolo diretto mostra che

$$K'(u)[v] = 2\int_\Omega \nabla u(x) \cdot \nabla v(x)\, dx$$

per ogni u, $v \in H^1(\Omega)$, ma non siamo autorizzati ad affermare che $\nabla K(u) = 2u$ (perché?)

Inversione della Convergenza Dominata

Teorema di Lebesgue. Sia Ω un aperto di $\mathbb{R}^N$, e sia $\{u_k\}_k$ una successione in $L^1(\Omega)$ tale che

1. $u_k(x) \to u(x)$ per q.o $x \in \Omega$;
2. esiste $v \in L^1(\Omega)$ tale che $|u_k(x)| \leq v(x)$ per q.o. $x \in \Omega$ e ogni k.

Allora $u \in L^1(\Omega)$ e $u_k \to u$ nella norma di $L^1(\Omega)$.

Questo risultato fondamentale di Teoria della Misura può essere *parzialmente* invertito, come mostra il seguente teorema. Per la dimostrazione, rimandiamo al libro di H. Brezis, Analisi funzionale.

Teorema. Sia Ω un aperto di $\mathbb{R}^N$, e sia $\{u_k\}_k$ una successione di $L^p(\Omega)$, $p \in [1, +\infty]$, tale che $u_k \to u$ in $L^p(\Omega)$. Allora esistono una sottosuccessione $\{u_{k_j}\}_j$ ed una funzione $v \in L^p(\Omega)$ tali che

1. $u_{k_j}(x) \to u(x)$ per q.o. $x \in \Omega$;
2. per ogni j, $|u_{k_j}(x)| \leq v(x)$ per q.o. $x \in \Omega$.

Questo teorema mostra che la convergenza forte in L^p implica — a meno di sottosuccessioni — l'esistenza di una funzione dominante.

Operatori di Nemitskii

Siano Ω un aperto limitato di $\mathbb{R}^N$, $N \geq 3$, con frontiera regolare, e sia $f\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ una funzione continua. Supponiamo che esistano $a > 0$ e $b > 0$ tali che

$$|f(t)| \leq a + b|t|^{2^*-1},$$

dove $2^* = 2N/(N-2)$ è l'esponente critico di Sobolev. Definiamo

$$F(t) = \int_0^t f(x)\,dx$$

e consideriamo il funzionale $J\colon H^1(\Omega) \to \mathbb{R}$ dato da

$$J(u) = \int_\Omega F(u(x))\,dx.$$

Proposizione. Sotto le ipotesi precedenti, J è un funzionale derivabile in $H^1(\Omega)$, e vale

$$J'(u)[v] = \int_\Omega f(u(x))v(x)\,dx$$

per ogni u, $v \in H^1(\Omega)$.

La dimostrazione non è immediata: mostriamo prima che J è Gâteaux-derivabile, e poi che la derivata di Gâteaux è continua. Come abbiamo visto sopra, ciò implica che J è Fréchet-derivabile.

- Derivata di Gâteaux

Per q.o. $x \in \Omega$, risulta

$$\lim_{t\to 0} \frac{F(u(x)+t(v(x))-F(u(x))}{t} = f(u(x))v(x).$$

Per il teorema di Lagrange, esiste un numero reale θ tale che $|\theta| \leq |t|$ e

$$\begin{aligned}\left|\frac{F(u(x)+t(v(x))-F(u(x))}{t}\right| &= |f(u(x)+\theta v(x))v(x)| \\ &\leq \left(a+b|u(x)+\theta v(x)|^{2^*-1}\right)|v(x)| \\ &\leq C\left(|v(x)|+|u(x)|^{2^*-1}|v(x)|+|v(x)|^{2^*}\right).\end{aligned}$$

Per Convergenza Dominata,

$$\lim_{t\to 0}\int_\Omega \frac{F(u(x)+t(v(x))-F(u(x))}{t}\,dx = \int_\Omega f(u(x))v(x)\,dx.$$

Poiché $v \mapsto \int_\Omega f(u(x))v(x)\,dx$ è un operatore lineare e continuo in $H^1(\Omega)$ (disuguaglianza di Hölder e di Sobolev), abbiamo individuato la derivata secondo Gâteaux di J:

$$J'_G(u)[v] = \int_\Omega f(u(x))v(x)\,dx.$$

- Derivata di Fréchet

  Mostriamo che $J'_G\colon H^1(\Omega) \to (H^1(\Omega))^*$ è un'applicazione continua. A tal fine, sia $\{u_k\}_k$ una successione che converge a u in $H^1(\Omega)$. Per il teorema di convergenza dominata inversa, possiamo supporre che — a meno di sottosuccessioni —

  - $u_k \to u$ in $L^{2^*}(\Omega)$;
  - $u_k(x) \to u(x)$ per q.o. $x \in \Omega$;
  - esiste $w \in L^{2^*}(\Omega)$ tale che $|u_k(x)| \leq w(x)$ per q.o. $x \in \Omega$ e ogni k.

Usiamo la disuguaglianza di Hölder:

$$
\begin{aligned}
|(J'_G(u_k) - J'_G(u))[v]| &\le \int_\Omega |f(u_k(x)) - f(u(x))||v(x)|\,dx \\
&\le \left(\int_\Omega |f(u_k(x)) - f(u(x))|^{\frac{2^*}{2^*-1}}\,dx \right)^{\frac{2^*-1}{2^*}} \times \\
&\quad \times \left(\int_\Omega |v(x)|^{2^*}\,dx \right)^{1/2^*}.
\end{aligned}
$$

La continuità di f implica $\lim_{k\to+\infty} |f(u_k(x)) - f(u(x))| = 0$ per q.o. $x \in \Omega$, e inoltre

$$
\begin{aligned}
|f(u_k(x)) - f(u(x))|^{\frac{2^*}{2^*-1}} &\le C \left(1 + |u_k(x)|^{2^*-1} + |u(x)|^{2^*-1}\right)^{\frac{2^*}{2^*-1}} \\
&\le C \left(1 + |w(x)|^{2^*-1} + |w(x)|^{2^*-1}\right)^{\frac{2^*}{2^*-1}} \\
&\le C \left(1 + |w(x)|^{2^*} + |w(x)|^{2^*}\right) \in L^1(\Omega).
\end{aligned}
$$

Per Convergenza Dominata,

$$
\lim_{k\to+\infty} \int_\Omega |f(u_k(x)) - f(u(x))|^{\frac{2^*}{2^*-1}}\,dx = 0.
$$

Perciò

$$
\begin{aligned}
\|J'_G(u_k) - J'_G(u)\| &= \sup\{(J'_G(u_k) - J'_G(u))[v] \mid v \in H^1(\Omega),\ \|v\| = 1\} \\
&\le C \left(\int_\Omega |f(u_k(x)) - f(u(x))|^{\frac{2^*}{2^*-1}}\, dx \right)^{\frac{2^*-1}{2^*}} \to 0.
\end{aligned}
$$

Riassumendo: abbiamo dimostrato che da ogni successione $\{u_k\}_k$ convergente a u è possibile estrarre una sottosuccessione tale che $J'_G(u_k) \to J'_G(u)$ in $(H^1(\Omega))^*$. È ora un esercizio di Topologia Generale dedurre che l'intera successione $\{u_k\}_k$ gode di questa proprietà (perché il limite è indipendente dalla sottosuccessione scelta).