

APPROSSIMAZIONE E INTERPOLAZIONE CON POLINOMI ALGEBRICI *

A. SOMMARIVA †

Conoscenze richieste. Spazio vettoriale. Spazio normato. Topologia indotta. Polinomi algebrici. Operatore delta di Kronecker.

Conoscenze ottenute. Migliore approssimazione in spazi normati. Migliore approssimazione in $(C([a, b]), \|\cdot\|_\infty)$ con polinomi algebrici. Teorema di Weierstrass. Teoremi di Jackson. Polinomi di Chebyshev. Costanti di Lebesgue.

Ore necessarie. 4 in aula e 2 di laboratorio.

1. Migliore approssimazione con polinomi algebrici in $(C([a, b]), \|\cdot\|_\infty)$. Indichiamo con

$$\mathbb{P}_n = \langle 1, x, x^2, \dots, x^n \rangle$$

lo spazio vettoriale dei polinomi algebrici univariati di grado n , aventi come nota dimensione $N_n = n + 1$.

Risulta evidente che se $S_n \equiv \mathbb{P}_n$ si ha

$$S_0 \subset S_1 \subset \dots \subset S_n \subset \dots$$

Inoltre se $(C([a, b]), \|\cdot\|_\infty)$ è lo spazio normato delle continue $C([a, b])$ in un intervallo chiuso e limitato $[a, b]$, dotato della norma infinito

$$\|f\|_\infty = \max_{x \in [a, b]} |f(x)|$$

si ha che $\cup_{n \in \mathbb{N}} \mathbb{P}_n \subseteq (C([a, b]), \|\cdot\|_\infty)$.

TEOREMA 1.1. Sia $(X, \|\cdot\|)$ uno spazio funzionale normato e

$$S_0 \subset S_1 \subset \dots \subset S_n \subset \dots$$

una successione crescente di sottospazi di dimensione finita $N_n = \dim(S_n)$. Allora

$$E_n(f) \equiv \inf_{p_n \in S_n} \|p_n - f\| \xrightarrow{n} 0$$

se e solo se $\cup_{n \in \mathbb{N}} S_n$ è denso in X .

DIMOSTRAZIONE.

Supponiamo sia $E_n(f) \equiv \inf_{p_n \in S_n} \|p_n - f\| \xrightarrow{n} 0$ per ogni $f \in X$. Sia $f \in X$ e sia fissato un arbitrario $\epsilon > 0$. Allora per un qualche n si ha $E_n(f) < \epsilon/2$ e dalle proprietà dell'estremo inferiore si ha pure che esiste $p \in S_n$ tale che $\|p - f\| < \epsilon$. Di conseguenza per ogni $\epsilon > 0$ esiste un certo $p \in \cup_{n \in \mathbb{N}} S_n$ tale che $\|p - f\| < \epsilon$, cioè $\cup_{n \in \mathbb{N}} S_n$ è denso in X .

Viceversa supponiamo che $\cup_{n \in \mathbb{N}} S_n$ sia denso in X e che sia $f \in X$. Essendo

$$S_0 \subset S_1 \subset \dots \subset S_n \subset \dots$$

*Ultima revisione: 1 marzo 2014

†DIPARTIMENTO DI MATEMATICA, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, VIA TRIESTE 63, 35121 PADOVA, ITALIA (ALVISE@MATH.UNIPD.IT)

la successione $E_n(f)$ è decrescente e quindi ammette limite. Essendo $\cup_{n \in \mathbb{N}} S_n$ denso in X , per ogni $\epsilon > 0$ esiste un elemento $p \in \cup_{n \in \mathbb{N}} S_n$ tale che $\|f - p\| \leq \epsilon$ e quindi $E_n(f) \equiv \inf_{p_n \in S_n} \|p_n - f\| \xrightarrow{n} 0$. \square

Ci interessa vedere come questo esempio sia applicabile al caso dei polinomi algebrici e quindi necessita disporre di un risultato di densità.

Sussiste il seguente teorema di Approssimazione di Weierstrass [5, p.107].

TEOREMA 1.2. *Ogni funzione continua in $[a, b]$ è limite uniforme di una successione di polinomi.*

Il Teorema 1.2 è equivalente a dire che $\cup_{n \in \mathbb{N}} \mathbb{P}_n$ è denso in $(C([a, b]), \|\cdot\|_\infty)$ e quindi dal Teorema 1.1 deduciamo che se $f \in C([a, b])$ allora $E_n(f) \equiv \inf_{p_n \in \mathbb{P}_n} \|p_n - f\| \xrightarrow{n} 0$.

Osserviamo che (cf. [6, p.151])

LEMMA 1.3. *Una funzione continua $f : S \rightarrow \mathbb{R}$, con S sottinsieme compatto di uno spazio normato, ha massimo e minimo, cioè esistono x_{\min} ed x_{\max} tali che*

$$f(x_{\min}) \leq f(x) \leq f(x_{\max})$$

per ogni $x \in S$. e che inoltre (cf. [6, p.150])

LEMMA 1.4. *In uno spazio normato di dimensione finita, un insieme è compatto se e solo se chiuso e limitato.*

Inoltre

LEMMA 1.5. *Sia X uno spazio normato e sia $f \in X$. Sia $S \subset X$ e $d(f, \cdot) = \|f - \cdot\|$. La funzione $d(f, \cdot)$ è continua in ogni punto di S .*

DIMOSTRAZIONE. Osserviamo che se $x, y \in X$ allora si vede facilmente che

$$||x| - |y|| \leq \|x - y\|.$$

Fissato $\epsilon > 0$, $x \in S$, sia $\delta = \epsilon$. Allora se $y \in S$ e $\|x - y\| \leq \delta = \epsilon$ abbiamo che

$$|d(f, x) - d(f, y)| = ||f - x| - |f - y|| \leq |(f - x) - (f - y)| = \|x - y\| \leq \epsilon$$

e quindi la funzione $d(f, \cdot)$ è continua in $x \in S$. \square

Siamo quindi in grado di affermare che

TEOREMA 1.6. *Sia S_k un sottospazio vettoriale di uno spazio normato X . Si supponga che S_k sia di dimensione finita e f sia un certo elemento di X . Allora esiste $s_k^* \in S_k$, detto di miglior approssimazione di f in S_k , tale che*

$$\|f - s_k^*\| = \min_{s \in S_k} \|f - s\|.$$

DIMOSTRAZIONE. L'elemento 0 dello spazio normato X appartiene certamente a ogni sottospazio S_k . Quindi sicuramente $E_n(f) \equiv \inf_{p_n \in S_n} \|p_n - f\| \leq \|f - 0\| = \|f\|$. La funzione $d(f, \cdot) = \|f - \cdot\|$ è continua. Inoltre essendo lo spazio S_n di dimensione finita, la palla $B(f, \|f\|) = \{p \in S_n : \|p - f\| \leq \|f\|\}$ centrata in f e avente raggio $\|f\|$ essendo chiusa (per la topologia indotta!) e limitata è pure compatta e quindi per il teorema di Weierstrass la funzione $d(f, \cdot)$ ha minimo in $B(0, \|f\|)$ e di conseguenza in S_n . \square

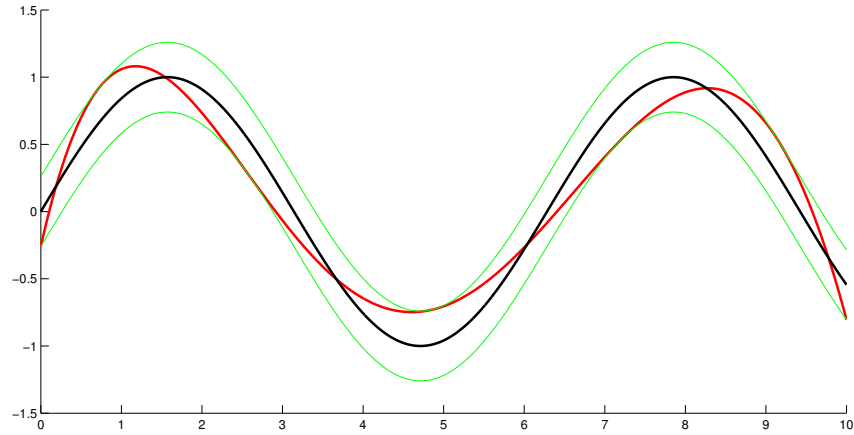


FIGURA 1.1. *Equioscillazione: in nero $\sin(x)$ in $[-5, 5]$, in rosso il polinomio di miglior approssimazione di grado 5, in verde le funzioni $f \pm E_n(f)$.*

Di conseguenza per ogni grado k , fissata $f \in (C([a, b]), \|\cdot\|_\infty)$ esiste un polinomio $p_k^* \in \mathbb{P}_k$ di miglior approssimazione.

Per quanto concerne l'unicità del polinomio di miglior approssimazione, vale il seguente teorema dovuto a Chebyshev e noto come di *equi-oscillazione* (cf. [2], p. 112 oppure [3], [5, p.149]).

TEOREMA 1.7. *Sia $f \in C([a, b])$ con $[a, b]$ limitato e $n \in \mathbb{N}$. Allora esiste un unico elemento $p_n^* \in \mathbb{P}_n$ di miglior approssimazione. Si caratterizza come segue. Esistono $n + 2$ elementi $a \leq x_0 < \dots < x_{n+1} \leq b$ non necessariamente unici tali che*

$$f(x_j) - p_n^*(x_j) = \sigma(-1)^j \min_{p \in \mathbb{P}_n} \|f - p\|_\infty, \quad j = 0, 1, \dots, n + 1$$

con $\sigma = 1$ oppure $\sigma = -1$.

Il calcolo del polinomio $p^* \in \mathbb{P}_n$ di miglior approssimazione di una funzione $f \in C([a, b])$ non è semplice. L'algoritmo di Remez ne permette una sua determinazione ma la descrizione dello stesso non è semplice. Una sua buona implementazione la si ha in ambiente Matlab cui siano state aggiunte le routines di Chebfun (cf. [4]). Il relativo comando si chiama `remez`.

Digitando sulla shell di Matlab

```
>>>deg=10;
>>> x=chebfun('x',[-5 5]);
>>> f=1./(1+x.^2);
>>>[p,err]=remez(f,deg);
```

otteniamo in p il polinomio di miglior approssimazione di grado 10 della funzione di Runge $1/(1 + x^2)$ nell'intervallo $[-5, 5]$ (come stabilito dalla seconda riga).

Dalla Tabella 1.1, risulta chiaro che la miglior approssimante polinomiale a parità di grado approssima meglio la funzione di Runge rispetto al $|x - 4|$ e viene da chiedersi se esistano delle stime sull'errore compiuto dalla migliore approssimante. Queste vengono fornite dai seguenti teoremi di Jackson [3, p.142], [1, p.224]

Grado	Errore $1/(1+x^2)$	Errore $ x-4 $	Errore $\sin(x)$
5	$2.17e-01$	$1.61e-01$	$1.08e-01$
10	$6.59e-02$	$8.40e-02$	$7.03e-04$
15	$2.98e-02$	$5.68e-02$	$2.31e-08$
20	$9.04e-03$	$4.28e-02$	$6.69e-12$
25	$4.08e-03$	$3.43e-02$	$2.33e-15$
30	$1.24e-03$	$2.86e-02$	—
35	$5.60e-04$	$2.46e-02$	—
40	$1.70e-04$	$2.15e-02$	—
45	$7.68e-05$	$1.91e-02$	—
50	$2.33e-05$	$1.72e-02$	—
55	$1.05e-05$	$1.56e-02$	—
60	$3.20e-06$	$1.43e-02$	—
65	$1.44e-06$	$1.32e-02$	—
70	$4.38e-07$	$1.23e-02$	—
75	$1.98e-07$	$1.14e-02$	—
80	$6.01e-08$	$1.07e-02$	—
85	$2.71e-08$	$1.01e-02$	—
90	$8.24e-09$	$9.51e-03$	—
95	$3.72e-09$	$9.00e-03$	—
100	$1.13e-09$	$8.55e-03$	—

TABELLA 1.1

Algoritmo di Remez. Errore assoluto di miglior interpolazione relativamente alla funzione di Runge $1/(1+x^2)$, $|x-4|$ e $\sin(x)$ in $[-5, 5]$.

TEOREMA 1.8. Per ogni $n \geq 1$ e per ogni $f \in C([a, b])$ esiste una costante M indipendente da n , a , b tale che

$$\inf_{p \in \mathbb{P}_n} \|f - p\|_\infty \leq M \omega \left(f, \frac{b-a}{n} \right)$$

dove $\omega(f, \cdot)$ è il modulo di continuità della funzione f su $[a, b]$, cioè

$$\omega(f, \delta) := \sup_{x, y \in [a, b], |x-y| \leq \delta} |f(x) - f(y)|.$$

TEOREMA 1.9. Se $f \in C^p([a, b])$, $p \geq 0$ si ha per ogni $n > p$

$$\inf_{p \in \mathbb{P}_n} \|f - p\|_\infty \leq M^{p+1} \frac{(b-a)^p}{n \cdot (n-1) \dots (n-p+1)} \omega \left(f^{(p)}, \frac{b-a}{n-p} \right).$$

TEOREMA 1.10. Se $f \in C^k([a, b])$, ed $f^{(k)}$ è α holderiana, cioè

$$\sup_{x, y \in [a, b]} |f^{(k)}(x) - f^{(k)}(y)| \leq M |x - y|^\alpha$$

per qualche $M > 0$, $0 < \alpha \leq 1$. Allora esiste una costante d_k indipendente da f e n per cui

$$\inf_{p \in \mathbb{P}_n} \|f - p\|_\infty \leq \frac{M d_k}{n^{k+\alpha}}, \quad n \geq 1.$$

Per i prossimi teoremi serve definire delle funzioni in campo complesso (cf. [5, p.12]).

DEFINIZIONE 1.11. Sia R una regione del piano complesso e sia $f : R \rightarrow \mathbb{C}$. Se $z_0 \in R$, f si dice analitica in z se ha una rappresentazione della forma

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_0)^n$$

valida in qualche intorno di z_0 .

Una funzione si dice analitica in R se e solo se è analitica in ogni punto di R .

Alcuni esempi di funzioni analitiche nel piano complesso sono i polinomi di grado arbitrario, le funzioni $\sin(z)$, $\cos(z)$, $\exp(z)$. La funzione di Runge $1/(1+z^2)$ è analitica in ogni regione non contenente $-i$ e i .

TEOREMA 1.12. Se f è analitica in un aperto Ω del piano complesso contenente $[a, b]$, allora esiste $\theta \in (0, 1)$ tale che $E_n(f) = \|p_n^* - f\| = O(\theta^n)$. Inoltre se f è intera (cioè si può scegliere $\Omega = \mathbb{C}$) allora la convergenza è superlineare, cioè

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} (E_n(f))^{1/n} = 0.$$

Per quanto visto, la funzione di Runge $f(x) = 1/(1+x^2)$, con $x \in [-5, 5]$ è olomorfa in un aperto Ω del piano complesso contenente $[-5, 5]$ (si noti che possiede i soli poli in $-i$ e i) e una verifica empirica con i dati della tabella stabilisce che $\theta \approx 0.814$.

La convergenza del polinomio di migliore approssimazione nel caso di $f(x) = \sin(x)$, con $x \in [-5, 5]$ è molto rapida. In effetti tale funzione è intera e quindi la convergenza superlineare.

Nel caso di $f(x) = |x - 4|$ da $||x - 4| - |y - 4|| \leq |x - y|$ e dal fatto che per $x \leq 4$ si ha $f(x) = 4 - x$ mentre per $x > 4$ si ha $f(x) = x - 4$ si vede facilmente che

$$\omega(f, \delta) := \sup_{x, y \in [a, b], |x - y| \leq \delta} |f(x) - f(y)| = \delta$$

e quindi dal Teorema 1.8 che per qualche M

$$\inf_{p \in \mathbb{P}_n} \|f - p\|_\infty \leq M \frac{b - a}{n}.$$

In effetti, un confronto coi dati stabilisce che posti $a = -5$ e $b = 5$ (estremi dell'intervallo)

$$\inf_{p \in \mathbb{P}_n} \|f - p\|_\infty \approx 0.085 \cdot \frac{b - a}{n} = \frac{0.85}{n}$$

e quindi una convergenza lenta di $E_n(f)$ a 0, se paragonata alla quantità $E_n(f) \approx 0.814^n$ trovata nell'esempio di Runge.

2. Alcune note sui polinomi di Chebyshev. Consideriamo la funzione

$$T_n(x) = \cos(n \arccos(x))$$

con $x \in [-1, 1]$ (cf. [1, p.211]). A priori, in virtù della presenza del coseno, T_n non sembra essere un polinomio. In realtà si vede subito che $T_0(x) = \cos(0 \arccos(x)) = 1$, $T_1(x) = \cos(1 \arccos(x)) = x$. Da note formule trigonometriche

$$\begin{aligned} \cos((n+1)\theta) &= (\cos(n\theta)) \cdot \cos(\theta) - (\sin(n\theta)) \cdot \sin(\theta) \\ \cos((n-1)\theta) &= (\cos(n\theta)) \cdot \cos(\theta) + (\sin(n\theta)) \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (2.1)$$

sommando membro a membro le due uguaglianze abbiamo

$$\cos((n+1)\theta) + \cos((n-1)\theta) = 2(\cos(n\theta)) \cdot \cos(\theta)$$

Posto $\theta = \arccos(x)$ si ha

$$T_{n+1}(x) + T_{n-1}(x) = 2(\cos(n\theta)) \cdot \cos(\theta) = 2T_n(x)x$$

da cui

$$T_{n+1}(x) = 2x T_n(x) - T_{n-1}(x)$$

Di conseguenza, per ricorrenza, si deduce che T_n è un polinomio di grado n e che inoltre per $n > 0$ è del tipo $T_n(x) = 2^{n-1}x^n + \dots$.

Gli zeri x_k del polinomio di Chebyshev sono i punti per cui $\cos(n \arccos(x_k)) = 0$, per cui

$$n \arccos(x_k) = \frac{\pi}{2} + k\pi = \frac{(2k+1)\pi}{2}$$

$$\arccos(x_k) = \frac{(2k+1)\pi}{2n}$$

$$x_k = \cos(\arccos(x_k)) = \cos\left(\frac{(2k+1)\pi}{2n}\right), \quad k = 0, \dots, n-1.$$

Notiamo che gli zeri del polinomio di Chebyshev T_n sono esattamente n , distinti e nell'intervallo $[-1, 1]$.

3. Costanti di Lebesgue. Sia $f \in C([a, b])$, con $[a, b]$ intervallo chiuso e limitato e si consideri il polinomio $p_n \in \mathbb{P}_n$ che interpola le coppie $(x_k, f(x_k))$ (per $k = 0, \dots, n$, x_k a due a due distinti). Si ponga per semplicità di notazione $f_k := f(x_k)$. Come è noto, indicato con L_k il k -simo polinomio di Lagrange, si ha

$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n f_k L_k(x).$$

Supponiamo che i valori di f_k siano perturbati (per esempio per via dell'arrotondamento del numero) e sostituiti con \tilde{f}_k . Otteniamo quindi quale polinomio interpolatore

$$\tilde{p}_n(x) = \sum_{k=0}^n \tilde{f}_k L_k(x).$$

Si ha così che

$$p_n(x) - \tilde{p}_n(x) = \sum_{k=0}^n (f_k - \tilde{f}_k) L_k(x)$$

$$|p_n(x) - \tilde{p}_n(x)| \leq \sum_{k=0}^n |f_k - \tilde{f}_k| |L_k(x)| \leq \left(\max_k |f_k - \tilde{f}_k| \right) \sum_{k=0}^n |L_k(x)|$$

e quindi posto

$$\Lambda_n = \max_{x \in [a, b]} \sum_{k=0}^n |L_k(x)|$$

si ha

$$\|p_n - \tilde{p}_n\|_\infty \leq \left(\max_k |f_k - \tilde{f}_k| \right) \cdot \Lambda_n.$$

Il valore Λ_n è nota come *costante di Lebesgue* dell'insieme di punti x_0, \dots, x_n (cf. [10]). Si vede immediatamente che è un indice di stabilità dell'interpolazione di Lagrange: più è piccola e più l'approssimazione è stabile (cf. [3, p.139-140]).

Ricordiamo che se $(X, \|\cdot\|_X)$, $(Y, \|\cdot\|_Y)$ sono due spazi normati, $A : X \rightarrow Y$ è un operatore lineare limitato se e solo se il numero

$$\|A\| = \sup_{\|x\| \leq 1} \|Ax\|_Y = \sup_{x \in X, x \neq 0} \frac{\|Ax\|_Y}{\|x\|_X}$$

è finito. Il numero reale $\|A\|$ si chiama *norma dell'operatore lineare* A (cf. [7, p.224]).

Si può mostrare che se \mathcal{L}_n è l'operatore (lineare e limitato) che associa a $f \in C([a, b])$ il suo polinomio di interpolazione nei nodi x_0, \dots, x_n allora

$$\Lambda_n = \max_{g \in C([a, b]), g \neq 0} \frac{\|L_n(g)\|_\infty}{\|g\|_\infty}$$

cioè la costante di Lebesgue è la norma dell'operatore di interpolazione \mathcal{L}_n rispetto alla norma $\|\cdot\|_\infty$.

TEOREMA 3.1. *Se $f \in C([a, b])$ e p_n è il suo polinomio di interpolazione relativo ai punti x_0, \dots, x_n si ha*

$$\|f - p_n\|_\infty \leq (1 + \Lambda_n) E_n(f) \tag{3.1}$$

dove

$$E_n(f) = \inf_{q_n \in \mathcal{P}_n} \|f - q_n\|_\infty$$

è l'errore compiuto dal polinomio di migliore approssimazione uniforme.

DIMOSTRAZIONE.

Se $f \in \mathcal{P}_n$, allora $f \equiv p_n \equiv q_n$ e quindi l'asserto è ovvio. Supponiamo quindi che f non appartenga a \mathcal{P}_n , cioè $f - q_n$ non sia la funzione nulla, qualsiasi sia $q_n \in \mathcal{P}_n$.

Per ogni polinomio $q_n \in \mathcal{P}_n$, è $\mathcal{L}_n(q_n) = q_n$, in quanto l'unico polinomio che interpola in $n + 1$ punti distinti un polinomio di grado n è il polinomio stesso. Inoltre

$$\mathcal{L}_n(f - q_n) = \mathcal{L}_n(f) - \mathcal{L}_n(q_n) = p_n - q_n.$$

Poichè $f - q_n$ non è la funzione nulla, abbiamo

$$\Lambda_n = \max_{g \in C([a,b]), g \neq 0} \frac{\|\mathcal{L}_n(g)\|_\infty}{\|g\|_\infty} \geq \frac{\|\mathcal{L}_n(f - q_n)\|_\infty}{\|f - q_n\|_\infty} \frac{\|p_n - q_n\|_\infty}{\|f - q_n\|_\infty} \quad (3.2)$$

e di conseguenza

$$\|(p_n - q_n)\|_\infty \leq \Lambda_n \cdot \|f - q_n\|_\infty. \quad (3.3)$$

Per concludere, osserviamo che per la disuguaglianza triangolare da $f - p = (f - q) + (q - p)$ e (3.3)

$$\begin{aligned} \|f - p_n\|_\infty &= \|(f - q_n) + (q_n - p_n)\|_\infty \\ &\leq \|f - q_n\|_\infty + \|q_n - p_n\|_\infty \\ &\leq \|f - q_n\|_\infty + \Lambda_n \|f - q_n\|_\infty \\ &= (1 + \Lambda_n) \|f - q_n\|_\infty \end{aligned} \quad (3.4)$$

□

Questo teorema è utile, perchè fa capire che se la costante di Lebesgue è piccola allora l'errore compiuto dall'interpolante polinomiale è poco più grande dell'errore di miglior approssimazione uniforme.



FIGURA 3.1. *Henri Lebesgue (1875-1941).*

Vediamo ora quali sono le stime delle costanti di Lebesgue per alcuni set di $n + 1$ punti x_0, \dots, x_n particolarmente interessanti, nell'intervallo $[-1, 1]$ (cf. [8]):

1. punti equispaziati: si dimostra che la costante di Lebesgue relativa a questi punti vale asintoticamente $\Lambda_n \approx \frac{2^{n+1}}{en \log(n)}$ (cf. [3, p.142]);
2. punti di Chebyshev: corrispondono a $\frac{\cos(2k-1)}{2(n+1)}$ dove $k = 1, \dots, n + 1$; si dimostra che la costante di Lebesgue relativa a questi punti vale asintoticamente

$$\frac{2}{\pi} \left(\log(n+1) + \gamma + \frac{8}{\pi} \right) + O\left(\frac{1}{(n+1)^2}\right)$$

dove $\gamma \approx 0.577$ è la *costante di Eulero-Mascheroni* (cf. [9]);

3. punti di Chebyshev estesi: sono definiti da $\frac{\cos(2k-1)}{2(n+1) \cdot \cos(\frac{\pi}{2n+1})}$ dove $k = 1, \dots, n+1$; si dimostra che la costante di Lebesgue relativa a questi punti vale asintoticamente

$$\frac{2}{\pi} \left(\log(n+1) + \gamma + \log\left(\frac{8}{\pi}\right) - \frac{2}{3} \right) + O\left(\frac{1}{\log(n+1)}\right);$$

4. configurazione ottimale: si dimostra che la minima costante di Lebesgue (non è nota esplicitamente!) vale

$$\frac{2}{\pi} \left(\log(n+1) + \gamma + \log\left(\frac{4}{\pi}\right) \right) + O\left(\frac{\log(\log(n+1))}{\log(n+1)}\right)$$

Vediamo usando Matlab quanto siano differenti tali costanti per gradi n quali 5, 10, \dots , 50.

```
>> n=(5:5:50)'; % VETTORE COLONNA DI GRADI.
>> % NODI EQUISPAZIATI.
>> s=(2.^(n+1))./(exp(1)*n.*log(n));
>> % NODI CHEBYSHEV.
>> % \frac{2}{\pi} \left( \log(n+1) + \gamma + \log\left(\frac{8}{\pi}\right) - \frac{2}{3} \right) + O\left(\frac{1}{\log(n+1)}\right)
>> t=(2/pi)*(log(n+1) + 0.577 + (8/pi));
>> [s t]

ans =

2.9258e+000 3.1291e+000
3.2720e+001 3.5150e+000
5.9352e+002 3.7536e+000
1.2877e+004 3.9267e+000
3.0679e+005 4.0626e+000
7.7425e+006 4.1746e+000
2.0316e+008 4.2698e+000
5.4825e+009 4.3526e+000
1.5112e+011 4.4259e+000
4.2351e+012 4.4915e+000

>>
```

Dalla stima precedente tra errore compiuto dall'interpolante rispetto a quello della miglior approssimazione uniforme, si capisce bene, una volta ancora, perchè i nodi di Chebyshev siano da preferire a quelli equispaziati.

4. Esercizi.

- (Non facile, e richiede qualche conto su carta). Si implementi un codice Matlab che approssimi la costante di Lebesgue di un set di punti x_0, \dots, x_n in un intervallo prefissato $[a, b]$, valutando la *funzione di Lebesgue* $\sum_{k=0}^n |L_k(x)|$ (dove al solito L_k è il k -simo polinomio di Lagrange) in $M = 1000$ punti test equispaziati in $[a, b]$. In seguito si valuti con tale codice la costante di Lebesgue di un set di 10 punti equispaziati in $[-1, 1]$ e in 10 punti di Chebyshev.
- (Facile, ma un po' lungo). Sfruttando i valori citati (a meno di O grandi), si confrontino i valori delle costanti di Lebesgue per i nodi equispaziati, di Chebyshev e di Chebyshev estesi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] K. Atkinson, *Introduction to Numerical Analysis*, Wiley, 1989.
- [2] K. Atkinson e W. Han, *Theoretical Numerical Analysis, A Functional Analysis Framework*, Springer, 2001.
- [3] V. Comincioli, *Analisi Numerica, metodi modelli applicazioni*, Mc Graw-Hill, 1990.
- [4] Chebfun, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/23972-chebfun>
- [5] P.J. Davis, *Interpolation and Approximation*, Dover, 1975.

- [6] D.H. Grieffel, *Applied Functional Analysis*, Dover, 2002.
- [7] A.N. Kolmogorov e S.V. Fomin, *Introductory real analysis*, Dover, 1970.
- [8] S.J. Smith, *Lebesgue constants in polynomial interpolation*, *Annales Mathematicae et Informaticae*, p. 109-123, 33 (2006) <http://www.ektf.hu/tanszek/matematika/ami>.
- [9] Wikipedia, (Costante di Eulero Mascheroni), http://it.wikipedia.org/wiki/Costante_di_Eulero-Mascheroni.
- [10] Wikipedia, (Lebesgue constant interpolation), [http://en.wikipedia.org/wiki/Lebesgue_constant_\(interpolation\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Lebesgue_constant_(interpolation)).