

FORMULARIO CALCOLO NUMERICO

Libera Longo

2023-01-27

1 Floating Point

Si definisce **insieme dei numeri macchina (floating-point)** con t cifre significative, base β e range (L, U) , l'insieme dei numeri reali definito nel modo seguente

$$\mathbb{F}(\beta, t, L, U) = \{0\} \cup \left\{ x \in \mathbb{R} = \text{sign}(x)\beta^p \sum_{i=1}^t d_i \beta^{-i} \right\}$$

ove t, β sono interi positivi con $\beta \geq 2$. Si ha inoltre

$$\begin{aligned} 0 \leq d_i \leq \beta - 1, & \quad i = 1, 2, \dots \\ d_i \neq 0, & \quad L \leq p \leq U \quad p \in [L, U] \end{aligned}$$

Usualmente U è positivo e L negativo.

I numeri dell'insieme \mathbb{F} sono ugualmente spazati tra le successive potenze di β , ma non su tutto l'intervallo.

Esempio $\beta = 2, t = 3, L = -1, U = 2$

$$\mathbb{F} = \{0\} \cup \{0.100 \times 2^p, 0.101 \times 2^p, 0.110 \times 2^p, 0.111 \times 2^p, p = -1, 0, 1, 2\}$$

dove 0.100 0.101 0.110 0.111 sono tutte le possibili mantisse e p il valore dell'esponente.

-
- In rappresentazione posizionale un numero macchina $x \neq 0$ viene denotato con $x = \pm.d_1 d_2 \dots d_t \beta^p$
 - La maggior parte dei calcolatori ha la possibilità di operare con lunghezze diverse di t , a cui corrispondono, ad esempio, la semplice e la doppia precisione.
 - E' importante osservare che l'insieme \mathbb{F} non è un insieme continuo e neppure infinito.

Come rappresentare un numero reale positivo x in un sistema di numeri macchina $\mathbb{F}(\beta, t, L, U)$?

- Il numero x è tale che $L \leq p \leq U$ e $d_i = 0$ per $i > t$; allora x è un numero macchina ed è rappresentato esattamente ($x \in \mathbb{F}$).
- $p \notin [L, U]$; il numero non può essere rappresentato esattamente ($x \notin \mathbb{F}$).
Se $p < L$, si dice che si verifica un underflow; solitamente si assume come valore approssimato del numero x il numero zero.
Se $p > U$ si verifica un overflow e solitamente non si effettua nessuna approssimazione, ma il sistema di calcolo dà un avvertimento più drastico, come ad esempio, l'arresto del calcolo.

Se una matrice $A n \times n$ ha un autovettore $\lambda = 0$, allora A è singolare.

Il costo computazionale per la risoluzione di un sistema triangolare è di: $O(\frac{n^2}{2})$

2 Condizionamento e Stabilità

- Un algoritmo è stabile se l'errore algoritmico è limitato
 - Può essere limitato da una costante c o da un'espressione

- Un sistema lineare è mal condizionato se l'errore relativo sul risultato è grande rispetto all'errore relativo sui **dati**
- Un sistema lineare è mal condizionato se il numero di condizione della matrice è grande
- Un problema è mal condizionato se ad una piccola perturbazione sui dati corrisponde una grande perturbazione sul risultato

$$K_2 = \frac{\rho}{\lambda_{min}}$$

dove ρ è il **raggio spettrale** e λ_{min} è il più piccolo degli **autovalori**

3 Fattorizzazione LR o LU

- Non è sempre possibile
 - Ad esempio se un perno per cui dividere è 0
 - Oppure se A è singolare
- Potrebbe non essere esatta se si presentano errori di arrotondamento
- Costo computazionale di $O(\frac{n^3}{3})$

3.1 Fattorizzazione LU con pivot

Usando la fattorizzazione LU con pivoting ($PA = LU$) il sistema $Ax = b$ si può risolvere risolvendo i due sistemi triangolari:

$$\begin{cases} Ly = Pb \\ Ux = y \end{cases}$$

Ogni matrice A $n \times n$ non singolare è fattorizzabile $PA = LU$, con P matrice di permutazione, L matrice triangolare inferiore con tutti 1 sulla diagonale e U triangolare superiore non singolare.

4 Fattorizzazione di Cholesky

- Ogni matrice A simmetrica e definita positiva si può fattorizzare come prodotto di due matrici triangolari L e L' dove L' è la trasposta di L
- Costo computazionale di $O(\frac{n^3}{6})$ è **minore della fattorizzazione LR**

5 Interpolazione

- Interpolando punti equispaziati l'errore di interpol. aumenta all'aumentare dei punti.
- Per ogni insieme di coppie $\{x_i, y_i\}$ con $i = 0 \dots n$ e i nodi x_i distinti tra loro, esiste un unico polinomio di grado $\leq n$, che chiamiamo polinomio interpolatore degli y_i negli x_i
- Esistono infiniti polinomi di grado n che interpolano n punti
 - ma solo uno che ne interpola $n + 1$

Vi è un numero arbitrario grande di funzioni matematiche che interpolano un dato insieme di punti.

6 Chebyshev

- NON si trovano per forza in $[-5, 5]$, ma **attenzione**
- Non sono equispaziati
- Scelta dei punti di Chebyshev come **ascisse** dei dati = interpolazione più stabile.

7 Numero di Condizionamento

In generale:

- $K(A) = \|A^{-1}\| * \|A\|$ (commutativa) \rightarrow dipende solo dalla matrice
- $K(A)$ esiste solo per matrici quadrate non singolari
 - $K(A)$ piccolo - n^p , $p = 0, 1, 2, 3 \rightarrow$ Problema ben condizionato.
 - $K(A)$ grande - $10^n \rightarrow$ Problema mal condizionato
 - ◊ Es: la matrice di Hilbert $\rightarrow h_{i,j} = \frac{1}{i+j-1}$ con $i, j = 1 \dots n$
- $K(A)$ dipende dalla norma usata ma l'ordine di grandezza è sempre lo stesso
- Si dimostra che per tutte le norme p , $K(A) \geq 1$
- Si dimostra che $\frac{1}{K(A)}$ è la minima distanza tra $A^{n \times n}$ e B , dove B è la più vicina matrice appartenente all'insieme delle matrici singolari
 - Questo significa che se $K(A)$ è alto, la matrice A si comporta quasi come una matrice singolare (il sistema non ha soluzioni) quindi, in questo caso, la soluzione è molto sensibile ai dati

8 Norme

- Le norme p sono tutte equivalenti, ovvero:
 - $\exists c_1, c_2$ tali che: $c_1 * \|x\|_p \leq \|x\|_q \leq c_2 * \|x\|_p$ con $1 < p, q < \infty$

La classe più importante di norme vettoriali è costituita dalle norme p :

$$\|x\|_p = \left(\sum_{i=1}^m |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad 1 \leq p < \infty$$

altre norme importanti sono:

NORMA	DEFINIZIONE	ESEMPIO
Norma Euclidea $p = 2$	$\ x\ _2 = \sqrt{\sum_{i=1}^m x_i ^2} = x^T x$	$x = (-1, 2, 3)$ $\ x\ _2 = \sqrt{1^2 + 2^2 + 3^2} = \sqrt{1 + 4 + 9} = \sqrt{14}$
Norma 1 $p = 1$	$\ x\ _1 = \sum_{i=1}^m x_i $	$x = (-1, 2, 3)$ $\ x\ _1 = 1 + 2 + 3 = 6$
Norma infinito	$\ x\ _\infty = \max_{1 \leq i \leq m} x_i $	$x = (-1, 2, 3)$ $\ x\ _\infty = \max(1 , 2 , 3) = 3$

$\ A\ _1$	$\max \sum_{i=1}^m a_{i,j} $ per $1 \leq j \leq n$
$\ A\ _\infty$	$\max \sum_{j=1}^n a_{i,j} $ per $1 \leq i \leq m$
Norma di Frobenius	$\ A\ _F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{i,j} ^2}$
$\ A\ _2$	$\sqrt{\rho(A^T A)}$ Dove ρ è il raggio spettrale ovvero l'autovalore massimo in modulo

Se A è una matrice quadrata $n \times n$, allora:

$$\|A\|_2 = \sqrt{\max_{\lambda \in A^T A} \lambda} \quad \|A\|_2 = \sqrt{\rho(A^T A)}$$

$$\|A\|_\infty = \max_i \sum_{j=1}^n |a_{i,j}|$$

9 Punti di massimo e minimo

- **Teorema** (Condizioni **necessarie** del primo ordine): se x^* è un punto di minimo locale e f è differenziabile con continuità in un intorno aperto di x^* , allora $\nabla f(x^*) = 0$. Un punto x^* tale che $\nabla f(x^*) = 0$ si chiama punto stazionario (minimo, massimo, sella).
- **Teorema** (Condizioni **necessarie** del secondo ordine): se x^* è un punto di minimo locale di f e f è due volte differenziabile con continuità in un intorno aperto di x^* , allora $\nabla f(x^*) = 0$ e $\nabla^2 f(x^*)$ è semidefinita positiva.
- **Teorema** (Condizioni **sufficienti** del secondo ordine): se:
 - f è due volte differenziabile con continuità in un intorno aperto di x^* ;
 - $\nabla f(x^*) = 0$ (condizione di punto stazionario);
 - $\nabla^2 f(x^*)$ è definita positiva.

Allora x^* è un punto di minimo in senso stretto di f .

- Se f è convessa, un punto di minimo locale è un punto di minimo globale. In particolare:
 - f convessa \rightarrow ogni punto di minimo locale x^* è punto di minimo globale di f .
 - f strettamente convessa \rightarrow esiste un unico punto di minimo globale.
- ◊ **E OGNI PUNTO STAZIONARIO E' MINIMO GLOBALE**

10 direzione e metodi di discesa

Definizione: Il vettore p è una direzione di discesa in f se esiste un $m > 0$ tale che

$$f(x + \alpha p) < f(x) \forall \alpha \in]0, m]$$

Lemma: Sia $f \in C^1$, il vettore p è una direzione di discesa di f se $p^T \nabla f(x) < 0$

- Un metodo di discesa garantisce $f(x_{k+1}) < f(x_k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$
- Nei metodi di discesa si calcola $x_{k+1} = x_k + a_k p_k$
- Nel metodo del gradiente la dir. di discesa di f in x_k è $-\nabla f(x_k)$
- $-\nabla f(x_k)$ ($\neq 0$) è sempre una direzione di discesa
- Un m. di discesa convergente converge al minimo locale (se str. convessa è globale)

11 minimi quadrati

Sia A una **matrice** $m \times n$, con $m > n$ e $rg(A) = k \leq n$. Allora il problema $\min \|Ax - b\|_2^2$

- Ammette sempre almeno una soluzione;
- Se $k = n$ (rango massimo) il problema ha una ed una sola soluzione;
 - Si risolve con equazioni normali $\rightarrow A^T * Ax = A^T b$
- Se $k < n$ il problema ha infinite soluzioni;
 - Tali soluzioni formano un sottospazio di \mathbb{R}^n di dimensione $n - k$
 - Si risolve con scomposizione **SVD** (in valori singolari)
 - ◊ SVD SI PUO' FARE SU QUALUNQUE MATRICE (anche per decomprimerla)
 - ◊ Valori singolari $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k > \sigma_{k+1} = \dots = \sigma_n = 0$ dove $k = rg(A)$
"ha esattamente r ($r = rg(A)$) valori singolari > 0 "