

Minimi quadrati in Matlab per Ingegneria dell'Energia Laboratorio. ¹

A. Sommariva²

Abstract

Interpolazione spline, esempi.

Ultima revisione: 17 dicembre 2018

1. Approssimazione ai minimi quadrati (discreti)

Si digiti sulla command-window di Matlab

```
>> x=0:0.01:2*pi;  
>> y=sin(2*x)+(10^(-1))*rand(size(x));  
>> plot(x,y,'r-');
```

Dal grafico si capisce che la funzione può essere interpretata come una *perturbazione* della funzione $\sin(2x)$ nell'intervallo $[0, 2\pi]$. Ci interessa approssimare non tanto la funzione plotata bensì $\sin(2x)$ (che in qualche modo è la funzione senza rumore).

Osserviamo che non ha senso utilizzare un interpolante polinomiale p di grado N nè una spline interpolante visto che *ricostruirebbero* la funzione *perturbata*.

Scriviamo sulla command-window di Matlab/Octave

```
help polyfit
```

In una recente release di Matlab abbiamo

```
POLYFIT Fit polynomial to data.  
POLYFIT(X,Y,N) finds the coefficients of a ...  
polynomial P(X)  
of degree N that fits the data, P(X(I))≈Y(I), in a ...  
least  
-squares sense.
```

L'help dice che `polyfit` calcola i coefficienti del polinomio di grado N che *meglio* approssima i dati $(X(k), Y(k))$, $k = 1, \dots, M$ nel senso dei *minimi quadrati*, ovvero determina l'unico polinomio $p_N \in \mathbb{P}_N$ tale che sia minima la quantità

$$\|f - P_N\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^M |f(x_i) - P_N(x_i)|^2}.$$

Nota. 1.1. Ricordiamo che se $u \in \mathbb{R}^M$ allora

$$\|u\|_2 := \sqrt{\sum_{i=1}^M u^2}$$

1

In Matlab, per calcolare tale quantità si usa il comando

```
norm(u, 2).
```

2. Regressione lineare

Il problema di determinare il polinomio di grado 1 che *meglio* approssima i dati $(X(k), Y(k))$, $k = 1, \dots, M$ nel senso dei *minimi quadrati*, viene usualmente detto *regressione lineare*.

Vediamone un esempio in Matlab.

```
function demo_regressione_lineare  
  
% Esempio regressione lineare.  
  
a=0; b=1;  
h=0.05; x=a:h:b; % ascisse equispaziate  
y=0.1+x+(10^(-1))*rand(size(x)); % ordinate  
  
% valutazione coeff. dell'approssimante ai minimi ...  
% quadrati  
% "p_n" di "f" di grado "1"  
coeff=polyfit(x,y,1);  
  
% valore "p_1" nelle ascisse "x"  
z=polyval(coeff,x);  
  
% errore ||f-p_1||_2  
err2=norm(z-y,2);  
fprintf('\n \t Errore regressione norma2: %1.2e',err2);  
  
% grafico del polinomio ai minimi quadrati di grado "1"  
ht=1/10000; u=a:ht:b;  
v=polyval(coeff,u);  
  
clf;  
% plot punti  
plot(x,y,'go','LineWidth',1,...  
      'MarkerEdgeColor','k',...  
      'MarkerFaceColor','g',...  
      'MarkerSize',10);  
hold on;  
% plot retta regressione  
plot(u,v,'k-','LineWidth',2);  
% titoli e legenda  
title('Regressione lineare');  
legend('Dati','Retta di regressione')  
legend();  
hold off;  
  
fprintf('\n \n');
```

Tale routine,

- definisce una funzione che corrisponde a una *perturbazione* della retta $r(x) = 0.1 + x$;
- determina mediante il comando

```
coeff=polyfit(x,y,1);
```

i coefficienti del polinomio p_1 di grado 1 che *miglior* approssima i dati $(x(k), y(k))$, $k = 1, \dots, 21 = (1/h) + 1$ nel senso dei *minimi quadrati*;

- valuta $\|f - p_1\|_2$;
- disegna in una stessa figura il grafico dei dati $(x(k), y(k))$, $k = 1, \dots, 21$ e del polinomio p_n , valutato mediante il comando

```
v=polyval(coeff,u);
```

nelle ascisse di test u ; si osservi che i punti vengono rappresentati mediante cerchietti, utilizzando varie preferenze di colore e grandezza;

- inserito il titolo *regressione lineare*, e una legenda.

Lanciato da command-window abbiamo

```
>> demo_regressione_lineare
Errore regressione norma2: 1.29e-01
>>
```

e la figura che segue.

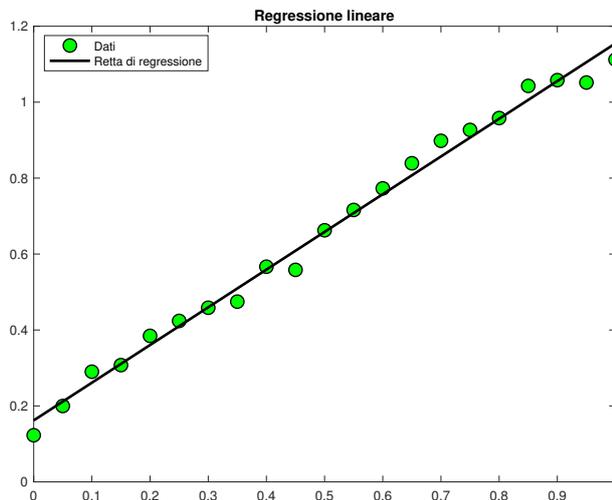


Figura 1: Grafico che illustra l'approssimazione ai minimi quadrati di grado 1 su una *perturbazione* della retta $0.1 + x$ (campionamento in nodi equispaziati).

La figura mostra che la retta soluzione del problema non interpola i dati, ma in generale li *approssima* tutti relativamente bene.

Nota. 2.1. Vista la presenza di numeri casuali, ogni esempio che viene compiuto mediante tale routine è potenzialmente diverso.

3. Un altro esempio

Digitiamo quindi in un file `demo_minimiquadrati.m`

```
function demo_minimiquadrati
a=0; b=2*pi;
h=0.01; x=a:h:b; % ascisse equispaziate
y=sin(2*x)+(10^(-1))*rand(size(x)); % ordinate

for n=0:8
% valutazione coeff. dell'approssimante ai minimi ...
quadrati
% "p_n" di "f" di grado "n"
coeff=polyfit(x,y,n);

% valore "p_n" nelle ascisse "x"
z=polyval(coeff,x);

% errore ||f-p_n||_2
err2=norm(z-y,2);
fprintf('\n \t n: %2.0f norma2: %1.2e',n,err2);

% grafico del polinomio ai minimi quadrati di grado ...
"n"
ht=1/10000; u=a:ht:b;
v=polyval(coeff,u);

clf;
plot(x,y,'r. ');
hold on;
plot(u,v,'k-', 'LineWidth',2);
titlestr=strcat('Minimi quadrati di grado:',num2str(...
n));
title(titlestr);
legend('Dati','Approssimante Minimi quadrati')
legend();
hold off;

% pausa di 3 secondi tra un grafico e il successivo
pause(3);
end
fprintf('\n \n');
```

Tale routine, dapprima definisce una funzione che corrisponde a una *perturbazione* di $\sin(x)$ in $[0, 2\pi]$.

Di seguito per n che varia da 1 a 8,

- determina i coefficienti del polinomio p_n di grado n che *miglior* approssima i dati $(x(k), y(k))$, $k = 1, \dots, 101 = (1/h) + 1$ nel senso dei *minimi quadrati*;
- valuta $\|f - p_n\|_2$;
- disegna in una stessa figura il grafico dei dati $(x(k), y(k))$, $k = 1, \dots, 101$ e del polinomio p_n , cambiando il titolo al variare del grado, e inserendo una legenda;
- mette in pausa per 5 secondi il processo.

Dal punto di vista numerico se il grado è basso, in virtù delle concavità e delle convessità di $\sin(2x)$, il polinomio p_N fornisce un'approssimazione scadente, mentre migliora per $N \geq 5$. Osserviamo che per $N > 10$ tale routine incorre in problemi di condizionamento e stampa un warning del tipo

```
Warning: Polynomial is badly conditioned. Remove ...
repeated data
points or try centering and scaling as ...
described in
HELP POLYFIT.
```

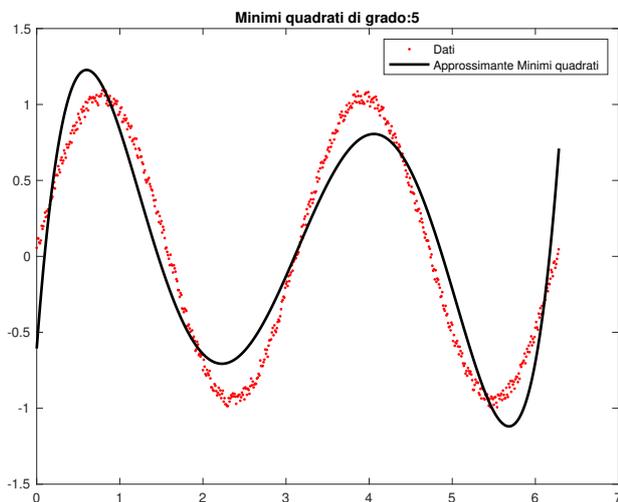


Figura 2: Grafico che illustra l'approssimazione ai minimi quadrati di grado 5 su una perturbazione della funzione $\sin(2x)$ (campionamento in nodi equispaziati).

Vediamo ora i risultati:

```
>> demo_minimiquadrati
n: 1 norma2: 1.63e+01
n: 2 norma2: 1.63e+01
n: 3 norma2: 1.50e+01
n: 4 norma2: 1.50e+01
n: 5 norma2: 5.50e+00
n: 6 norma2: 5.50e+00
n: 7 norma2: 1.22e+00
n: 8 norma2: 1.22e+00
>>
```

I risultati variano da esperimento a esperimento, visto la presenza di numeri casuali.

Nota. 3.1. Ricordiamo che in generale, non ha senso cercare un grado troppo alto del polinomio di miglior approssimazione p_N in quanto si otterrebbe a partire da un certo valore il polinomio interpolante, mentre un grado troppo basso, come già detto, non ricostruirebbe adeguatamente l'andamento della funzione f .

4. Esercizio

Si supponga che le coppie, (x_k, y_k) , $k = 1, \dots, 21$, corrispondano alla k -sima riga della matrice

```
dati=[ 1.0000e+00 -1.9450e+00
1.2000e+00 -1.2530e+00
1.4000e+00 -1.1400e+00
1.6000e+00 -1.0870e+00
1.8000e+00 -7.6000e-01
2.0000e+00 -6.8200e-01
2.2000e+00 -4.2400e-01
2.4000e+00 -1.2000e-02
2.6000e+00 -1.9000e-01
2.8000e+00 4.5200e-01
3.0000e+00 3.3700e-01
3.2000e+00 7.6400e-01
3.4000e+00 5.3200e-01
3.6000e+00 1.0730e+00
3.8000e+00 1.2860e+00
4.0000e+00 1.5020e+00
4.2000e+00 1.5820e+00
4.4000e+00 1.9930e+00
4.6000e+00 2.4730e+00
4.8000e+00 2.5030e+00
5.0000e+00 2.3220e+00];
```

Si definisca un file

`esercizio_regressione_lineare`

come segue.

- Mediante il comando `dati(:,1)`, `dati(:,2)`, si selezionino le ascisse x e le ordinate y .
- Si calcolino i coefficienti P della retta di regressione.
- Stampare il polinomio di regressione p_1^* utilizzando `fprintf`. Il polinomio è $P(1) \cdot x + P(2)$ oppure $P(2) \cdot x + P(1)$?
- Si valuti il polinomio di regressione p_1^* nei punti equispaziati x_j e sia $z_k = p_1^*(x_k)$.
- Si calcoli mediante tali valutazioni, l'errore di regressione

$$\sqrt{\sum_{k=1}^{21} (y_k - z_k)^2}$$

e lo si stampi a video.

- In una figura si determino le coppie estratte dal file di dati e si disegni la retta di regressione.

- [1] S.D. Conte e C. de Boor, *Elementary Numerical Analysis, 3rd Edition*, Mc Graw-Hill, 1980.
[2] Wikipedia, Least Squares, http://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares.
[3] Wikipedia, Minimi quadrati, http://it.wikipedia.org/wiki/Minimi_quadrati.