

## Esercitazione 5

*Istruzioni trattate:* poly, ones, horner, gcf, gca.

Nella prima parte di questa esercitazione vedremo un esempio concreto di *problema mal condizionato* relativo al calcolo di uno zero di una funzione. Applicheremo la procedura **Bisezione**, in una versione leggermente modificata rispetto a quella presentata nell'Esercitazione 3, a due realizzazioni, *diverse ma vicine*, della funzione:

$$f(x) = (x - 2)^{13}$$

Nella seconda parte vedremo una realizzazione del *metodo di Newton* e la utilizzeremo per approssimare lo zero della funzione  $f$ . Nella terza parte descriveremo, in relazione ad un disegno prodotto nella prima parte, alcune nozioni relative agli *oggetti grafici* di Scilab.

### Prima parte

Consideriamo la seguente realizzazione del metodo di *bisezione*:

```
function [z,s,d,iter] = Bisezione(f,a,b)
//
// Applica il metodo di bisezione alla funzione f a partire dall'intervallo
// [a,b].
// L'iterazione si arresta quando si è trovato uno zero di f oppure
// l'intervallo non varia.
//
// z: vettore di numeri reali contenente la parte calcolata della successione
// numerica.
// s,d: estremo sinistro e destro, rispettivamente, dell'ultimo intervallo
// calcolato.
// iter: numero di iterazioni effettuate.
//
iter = 0;
if f(a)*f(b) > 0 then
    error('la funzione non assume valori di segno opposto agli estremi');
else
    z = (a+b)/2;
    while ( z($) ~= a & z($) ~= b & f(z($)) ~= 0 ),
        if sign(f(a)) ~= sign(f(z($))) then b = z($);
        else a = z($); end;
        z($+1) = (a+b)/2;
        iter = iter + 1;
    end;
    s = a; d = b;
end;
endfunction
```

In questa realizzazione si è scelto di arrestare la costruzione della successione se *l'arrotondato del punto medio dell'ultimo intervallo calcolato coincide con uno degli estremi dell'intervallo stesso* oppure *si è trovato uno zero della funzione f*. In entrambi i casi è inutile proseguire l'iterazione.

Definiamo le funzioni F e G alle quali applicheremo la procedura **Bisezione**:

```
function y = F(x)
    y = (x - 2) .^ 13;
endfunction
//
function y = G(x)
```

```

p = poly(2*ones(1,13), 'x');
y = horner(p,x);
endfunction

```

La prima, F, è la *realizzazione ingenua* della funzione  $f$ . Per capire cosa è G, descriviamo tre nuovi comandi utilizzati nella sua definizione.

- **poly**

Questa *funzione predefinita* è una realizzazione della funzione che restituisce *il polinomio* che ha *coefficienti* assegnati o *il polinomio monico* che ha *radici* assegnate. Precisamente, assegnato un vettore  $v$ , riga o colonna, a componenti  $v_1, \dots, v_n$ :

$$\text{poly}(v, 'X')$$

restituisce *un'approssimazione del polinomio monico in X di grado n che ha radici  $v_1, \dots, v_n$* ,<sup>1</sup>

$$\text{poly}(v, 'X', 'coeff')$$

restituisce *il polinomio in X di grado al più  $n-1$  e coefficienti  $v_1, \dots, v_n$ :  $v_1 + v_2 X + \dots + v_n X^{n-1}$* .  
Ad esempio:

```

-->poly([1,2,3], 'X')
ans =

```

$$- 6 + 11X - 6X^2 + X^3$$

```

-->poly(3*[1,2,3], 's', 'coeff')
ans =

```

$$3 + 6s + 9s^2$$

Si osservi che l'oggetto restituito dalla funzione `poly` è di tipo *polinomio* che *non è una funzione*. In particolare: il valore della funzione associata ad un oggetto di tipo *polinomio* si calcola, in *Scilab*, con una specifica *funzione predefinita* (la *funzione predefinita horner*, descritta sotto).

- **ones**

Questa *funzione predefinita* restituisce, quando applicata ad una coppia di numeri interi positivi  $r$  e  $c$ , *la matrice di dimensione  $r \times c$  in cui ciascun elemento ha valore 1*.

- **horner**

Questa *funzione predefinita* è una realizzazione della funzione che, dati *un polinomio p* ed una matrice  $x$ , restituisce la matrice della stessa dimensione di  $x$  di elemento  $i, j$  il valore del polinomio  $p$  in  $x_{ij}$  calcolato con il *metodo di Horner*<sup>2</sup>. Ad esempio:

```

-->p = poly([1,2,3]', 's')
p =

```

$$- 6 + 11s - 6s^2 + s^3$$

```

-->horner(p, [1,2,3])
ans =

```

$$0. \quad 0. \quad 0.$$

<sup>1</sup>La stringa 'X' può essere sostituita da una quasi arbitraria stringa di *al più* quattro caratteri.

<sup>2</sup>Per approfondire, vedere: [https://en.wikipedia.org/wiki/Horner's\\_method#Description\\_of\\_the\\_algorithm](https://en.wikipedia.org/wiki/Horner's_method#Description_of_the_algorithm).

```
-->horner(p,eye(2,2))
```

```
ans =
```

```
    0.   - 6.  
   - 6.    0.
```

```
-->p(1)
```

```
ans =
```

```
          2   3  
   - 6 + 11s - 6s + s
```

```
-->p(2)
```

```
!--error 21
```

```
Indice non valido.
```

Dunque: anche  $G$  è una realizzazione della funzione  $f$ .

Applichiamo la procedura Bisezione ad  $F$ .

```
-->[z,s,d,iter] = Bisezione(F,a,b);
```

```
-->printf('\n   z = %10.9e , F(z) = %3.2e , iter = %d , ampiezza = %3.2e\n', ...  
        z($),F(z($)),iter,d-s);
```

```
z = 2.000000000e+00 , F(z) = 0.00e+00 , iter = 51 , ampiezza = 1.33e-15
```

La procedura dichiara (correttamente) che  $z = 2$  è uno zero della funzione  $F$ . Ci domandiamo se sia possibile dedurne che  $2$  è un'approssimazione dello zero di  $f$  con errore assoluto non superiore a circa  $1.33 \cdot 10^{-15}$ .

Questa seconda deduzione è corretta: secondo il nostro modello le *funzioni predefinite*  $\ominus$  e  $\wedge$  restituiscono l'arrotondato del valore esatto in  $F(2, 53)$  e quindi per ogni  $\xi \in F(2, 53)$  esiste  $\theta \in \mathbb{R}$  tale che:

$$F(\xi) = f(\xi)(1 + \theta) \quad \text{e} \quad |\theta| < (1 + u)^{14} - 1 \approx 14u \approx 1.554 \cdot 10^{-15}$$

Dunque:  $F$  è un'approssimazione sufficientemente accurata di  $f$  da garantire che  $F$  ed  $f$  hanno sempre lo stesso *segno*. Se il calcolatore fosse in grado di calcolare i valori necessari della funzione  $f$ , otterremmo:

$$\text{Bisezione}(f, a, b) = \text{Bisezione}(F, a, b)$$

Applichiamo adesso la procedura Bisezione a  $G$ .

```
-->[z,s,d,iter] = Bisezione(G,a,b);
```

```
-->printf('\n   z = %10.9e , G(z) = %3.2e , iter = %d , ampiezza = %3.2e\n', ...  
        z($),G(z($)),iter,d-s);
```

```
z = 2.177268961e+00 , G(z) = -4.66e-10 , iter = 52 , ampiezza = 4.44e-16
```

La procedura dichiara (correttamente) che la funzione  $G$  assume valori di segno opposto agli estremi dell'intervallo  $[s, d]$  contenente  $z$  e di ampiezza circa  $4.44 \cdot 10^{-16}$ . Ci domandiamo se sia possibile dedurne che  $z$  è un'approssimazione di uno zero di  $f$  con errore assoluto non superiore a circa  $4.44 \cdot 10^{-16}$ .

La distanza tra  $2$  (zero di  $f$ ) e  $z$  è circa  $0.177 > 4.44 \cdot 10^{-16}$  e quindi, se la deduzione fosse corretta, lo zero di  $f$  approssimato da  $z$  sarebbe *certamente* diverso da  $2$ . *Ma  $f$  non ha zeri diversi da 2: la deduzione non può essere corretta.*

Ciò che rende non corretta la deduzione è che (a) *il calcolo dello zero di  $f$  è mal condizionato*: esistono perturbazioni di  $f$  di misura arbitrariamente piccola che generano funzioni con qualche zero che dista da quello di  $f$  molto più della misura della perturbazione, e (b) la funzione  $G$  è la restrizione ad  $M$  di una di tali perturbazioni.

Si può avere un'idea della misura della perturbazione di  $f$  calcolata usando  $G$ , nei pressi di  $2$ , disegnando un'approssimazione del grafico della funzione  $|F \ominus G|$ :

```
-->xi = linspace(-0.23,0.23,700)'; xi = xi + 2;
-->clf(); plot2d(xi,abs(F(xi)-G(xi)),style = 5); xgrid();
-->xlabel('xi'); ylabel('| F(xi) - G(xi) |');
```

Si ottiene il disegno riportato in Figura 1. Dal disegno risulta che per molti elementi  $\xi \in M$  la

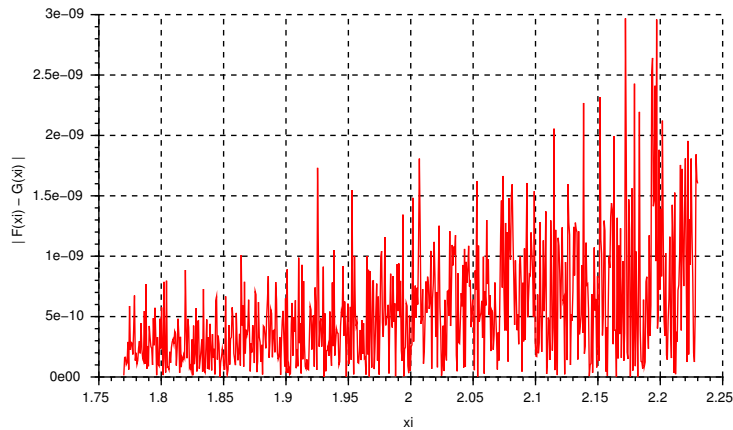


Figura 1: Approssimazione del grafico di  $|F(\xi) - G(\xi)|$ .

distanza tra  $F(\xi)$  e  $G(\xi)$  supera  $10^{-9}$ . Dallo studio di  $F$  fatto sopra si può dedurre che per ogni  $\xi \in [2 - 0.23; 2 + 0.23] \cap M$  si ha:  $|F(\xi) - f(\xi)| \leq 10^{-23}$  e quindi, essendo  $10^{-9} \gg 10^{-23}$ , si può concludere che per molti valori di  $\xi$  la distanza tra  $G(\xi)$  e  $f(\xi)$  supera  $10^{-9}$ . Anche supponendo che la misura effettiva della perturbazione di  $f$  calcolata usando  $G$  sia  $10^{-9}$  non è ragionevole sperare di approssimare lo zero di  $f$  con errore assoluto inferiore a  $\sqrt[13]{10^{-9}} \approx 0.2$ . Questa conclusione si conferma disegnando approssimazioni del grafico di  $F \approx f$  e di  $G$  nei pressi di 2 su uno stesso piano cartesiano (il significato dei comandi dell'ultima riga sarà spiegato nella seconda parte):

```
-->clf(); plot2d(xi,[G(xi),F(xi)],style = [5,2]); xgrid();
-->xlabel('xi'); legend('G(xi)', 'F(xi)');
```

```
-->assi = gca(); assi.children(2).children(1).thickness = 2;
```

Si ottiene il disegno riportato in Figura 2. Dal disegno risulta che la funzione  $G$  assume certamente valori positivi e valori negativi negli intervalli  $[1.8; 2)$  e  $(2; 2.2]$ , e questo spiega il risultato della procedura *Bisezione* applicata a  $G$ .

In conclusione, il calcolo dello zero di  $f$  è mal condizionato e quindi:

- (a) esistono *piccole* perturbazioni di  $f$  con *qualche* zero *distante* da quello di  $f$ , e  $G$  fornisce valori di una di esse;
- (b) esistono *piccole* perturbazioni di  $f$  che hanno *solo* zeri *vicini* da quello di  $f$ , e  $F$  fornisce valori di una di esse.

## Seconda parte

La definizione che segue è una realizzazione del *metodo di Newton* che utilizza un criterio d'arresto di tipo assoluto.

```
function x = MetodoNewton(f,d1f,x0,delta)
//
// Applica il metodo di Newton alla funzione f a partire dal
```

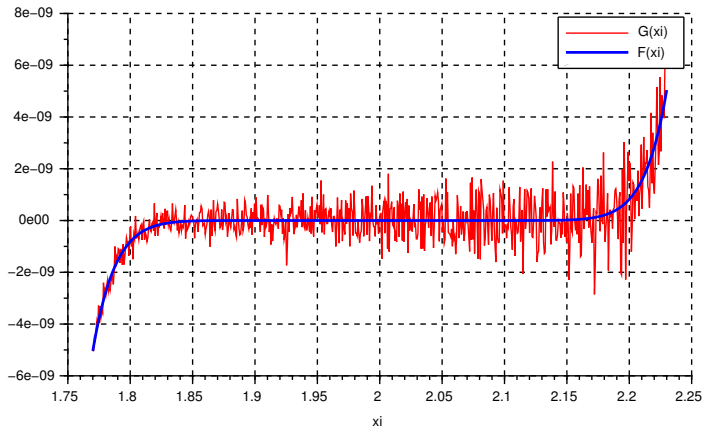


Figura 2: Approssimazioni del grafico di  $F(\xi)$  e di  $G(\xi)$ .

```
// punto x0. dif è una function che realizza la derivata prima
// di f. La costruzione della successione si arresta quando
// | f(x) / dif(x) | < delta oppure dopo kmax iterazioni
// (valore predefinito per kmax: 500).
//
// x: riga contenente la porzione di successione calcolata.
//
kmax = 500;
k = 0;
x = x0;
while (abs( f(x($)) / dif(x($)) ) >= delta & k < kmax),
    x($+1) = x($) - f(x($)) / dif(x($));
    k = k + 1;
end;
endfunction
```

Per utilizzare la procedura ed ottenere un'approssimazione dello zero di  $f$ , occorre definire una funzione da utilizzare per approssimare i valori di  $f'$ .

```
function y = d1F(x)
    y = 13 * (x - 2).^12;
endfunction
```

Applichiamo la procedura `MetodoNewton`:

```
-->x0 = 3; delta = 1d-5;
-->zN = MetodoNewton(F,d1F,x0,delta);
-->printf('\n zN = %10.9e , F(zN) = %3.2e , iter = %1.0f , zN - 2 = %3.2e\n', ...
    zN($),F(zN($)),length(zN)-1, zN($) - 2)

zN = 2.000127833e+00 , F(zN) = 2.43e-51 , iter = 112 , zN - 2 = 1.28e-04
```

La procedura determina, con 112 iterazioni, un'approssimazione dello zero di  $f$  con errore assoluto (circa) uguale a  $10^{-4}$ . Si osserva che (a) la procedura termina dopo numero di iterazioni circa *doppio* rispetto a quello dalla procedura *Bisezione* e (b) l'accuratezza dell'approssimazione ottenuta *non* è quella,  $10^{-5}$ , richiesta dall'utilizzatore.

Prima di discutere queste osservazioni si rileva che la funzione  $f$  ha un solo zero  $\alpha = 2$  e  $f'(\alpha) = 0$ : la condizione sufficiente che garantisce l'utilizzabilità del metodo di Newton per approssimare lo zero

di  $f$  non è soddisfatta. In questo caso, però, il metodo di Newton è quello ad un punto definito dalla funzione:

$$h(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)} = x - \frac{x-2}{13} = \frac{12x+2}{13}$$

e questa funzione *verifica* la condizione sufficiente di utilizzabilità per approssimare il punto unito, infatti per ogni  $x$  (in particolare per  $x = \alpha$ ) si ha  $h'(x) = \frac{12}{13} < 1$ .

Il valore  $h'(\alpha)$  è *prossimo ad uno* anziché uguale a zero e quindi, *contrariamente a quanto accade nel caso in cui  $f'(\alpha) \neq 0$* , il metodo ha ordine di convergenza *uno*. Inoltre la successione converge ad  $\alpha$  come  $(\frac{12}{13})^k$ , ovvero, come constatato nel punto (a): molto più *lentamente* di quelle generate dal metodo di bisezione. Infine, il criterio d'arresto scelto utilizza  $|x_{k+1} - x_k|$  per stimare l'errore assoluto  $|x_k - \alpha|$  ma questa stima *non è buona* poiché:

$$|x_k - \alpha| = 13|x_{k+1} - x_k|$$

Quando la condizione  $|x_{k+1} - x_k| < 10^{-5}$  è verificata si ottiene, come constatato nel punto (b):  $|x_k - \alpha| < 1.3 \cdot 10^{-4}$ .

### Terza parte

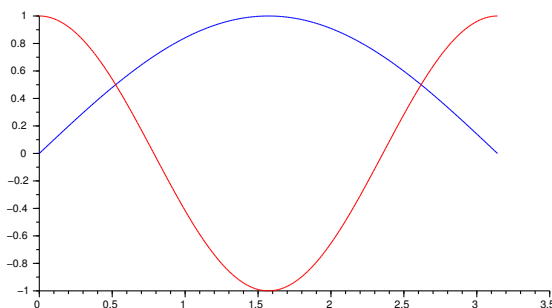
*Scilab* consente all'utilizzatore di *creare e gestire* molti *oggetti grafici* ciascuno dei quali possiede varie *proprietà* che possono essere *visualizzate e modificate*. Ad ogni istante, gli oggetti esistenti (che l'utilizzatore ha creato) sono organizzati in una o più *strutture ad albero*, una per ogni finestra grafica esistente, e con una opportuna *visita* è possibile accedere alle proprietà di ciascun oggetto. Gli oggetti grafici sono creati con appositi comandi che agiscono su quella che è la *finestra grafica corrente* all'istante in cui il comando è eseguito.

Consideriamo, ad esempio, il seguente dialogo:

```
-->x = linspace(0,%pi,300)';
```

```
-->plot2d(x,[sin(x),cos(2*x)],style = [2,5]);
```

Il comando `plot2d`: (a) crea la Finestra grafica numero 0, (b) la dichiara *finestra grafica corrente*, e (c) in essa crea il disegno riportato, a sinistra, nella Figura 3. Nella stessa Figura, a destra, è riportato schematicamente l'albero che organizza gli oggetti grafici esistenti nella Finestra grafica numero 0 (vedremo tra poco come ottenere l'albero associato ad una finestra grafica).



```
Figure
Axes
Compound
Polyline(1) , Polyline(2)
```

Figura 3: Contenuto della Finestra grafica numero 0 e albero associato.

L'albero ha per *radice* un oggetto di tipo `Figure` che ha un figlio, oggetto di tipo `Axes`. Quest'ultimo ha un figlio, oggetto di tipo `Compound` che, infine, ha due figli, oggetti di tipo `Polyline`. I figli di un oggetto sono *numerati* in ordine di *anzianità crescente*: il figlio numero uno è l'ultimo creato, il numero due l'ultimo creato dei rimanenti ecc. Dunque gli oggetti `Polyline(1)` e `Polyline(2)`, sono, rispettivamente, la curva rossa (creata per seconda) e quella blu (creata per prima).

Per accedere alle proprietà di un oggetto grafico occorre creare un *puntatore all'oggetto grafico*. In *Scilab* un puntatore di questo tipo è chiamato *graphic handle*.

- `gcf`

Questa *funzione predefinita* restituisce un puntatore all'oggetto di tipo `Figure` radice dell'albero associato alla *finestra grafica corrente*.

- `gca`

Questa *funzione predefinita* restituisce un puntatore all'oggetto di tipo `Axes` corrispondente agli *assi correnti*.

Il comando:

```
FGO = gcf();
```

crea la variabile di nome `FGO`, puntatore alla radice dell'albero associato alla *finestra grafica corrente*: la Finestra grafica numero 0. Se chiediamo a *Scilab* di mostrare il valore della variabile `FGO` otteniamo *un elenco di tutte le proprietà dell'oggetto puntato con relativo valore*. L'elenco inizia con:

```
FGO =
```

```
Handle of type "Figure" with properties:
```

```
=====
```

```
children: "Axes"
```

Le proprietà di un oggetto di tipo `Figure` sono elencate e descritte nella pagina di *help* relativa al termine *figure properties*. A ciascuna delle proprietà dell'oggetto puntato dalla variabile `FGO` è associata una variabile di nome `FGO.<nome della proprietà>` il cui valore controlla la proprietà. Ad esempio:

```
-->FGO.figure_size
```

```
ans =
```

```
1442.    852.
```

```
-->FGO.children.grid
```

```
ans =
```

```
- 1. - 1.
```

Il valore della variabile `FGO.figure_size` è una riga di due numeri interi che rappresentano, in *pixel*, la *larghezza* e l'*altezza* della finestra grafica. La variabile `FGO.children.grid`, invece, controlla la proprietà di nome `grid` del *figlio* dell'oggetto puntato da `FGO`. La variabile `FGO.children` esiste – infatti un oggetto di tipo `Figure` ha una proprietà di nome `children` – ed il valore è un puntatore al figlio dell'oggetto puntato da `FGO`: un oggetto di tipo `Axes`. Quest'ultimo ha una proprietà di nome `grid` che controlla la presenza della griglia. Il valore della variabile `FGO.children.grid` è una riga di due numeri interi ciascuno dei quali controlla la parte di griglia parallela ad uno degli assi con la seguente codifica:  $-1$  significa griglia assente,  $n \neq 0$  significa griglia presente disegnata nel colore opportuno. Ad esempio, il comando:

```
-->FGO.children.grid = [3,1];
```

aggiunge la griglia al disegno come mostrato in Figura 4.

Una delle proprietà di un oggetto di tipo `Polyline` si chiama `thickness` ed il valore è un numero intero che specifica, in *pixel*, lo spessore della linea. Lo spessore della linea rossa della figura nella Finestra grafica numero 0 vale:

```
-->FGO.children.children.children(1).thickness
```

```
ans =
```

```
1.
```

e per cambiarlo:

```
-->FGO.children.children.children(1).thickness = 2;
```

L'effetto è visibile nella Figura 5 che riproduce il contenuto della Finestra grafica 0. Si osservi che la curva rossa è sovrapposta a quella blu ed entrambe sono sovrapposte alla griglia: *ad ogni istante l'ultimo oggetto creato è sovrapposto a quelli esistenti*. La griglia, visibile o no, è creata contestualmente alla finestra grafica.

Per ottenere l'albero associato alla *finestra grafica corrente* possiamo utilizzare due metodi:



Figura 4: `FG0.children.grid = [3,1]`.

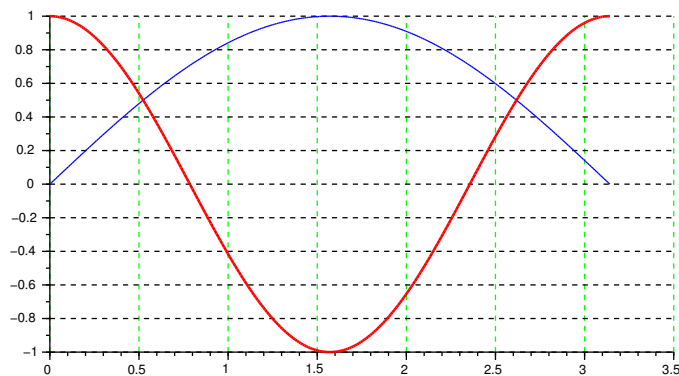


Figura 5: `FG0.children.children.children(1).thickness = 2`.

- (a) Con pazienza, si esplora l'albero nodo per nodo, a partire dalla radice, facendosi mostrare ogni volta le proprietà dell'oggetto e leggendo il valore della proprietà `children`.
- (b) Si seleziona la finestra grafica che interessa e dal menu a tendina *Modifica* (rispettivamente: *Edit* se "Scilab parla inglese") in alto a sinistra si seleziona *Proprietà della figura* (rispettivamente: *Figure properties*). Si apre una finestra *Figure editor* dove, insieme ad altre cose, è visualizzato l'albero associato alla finestra grafica. Tramite questa stessa finestra è possibile gestire le proprietà degli oggetti grafici presenti nella finestra grafica.

Come esempio finale, esaminiamo il disegno riportato in Figura 2. La Figura 6 riporta, schematicamente, l'albero associato alla finestra grafica che contiene il disegno. La proprietà modificata con i comandi:

```
assi = gca(); assi.children(2).children(1).thickness = 2;
```

è lo spessore della linea blu (il grafico di `F`). Infatti il figlio numero *due* dell'oggetto di tipo `Axis` è quello di tipo `Compound` – creato *prima* dell'altro figlio – ed il figlio numero *uno* dell'oggetto di tipo `Compound` è il grafico di `F` – creato *dopo* l'altro figlio.



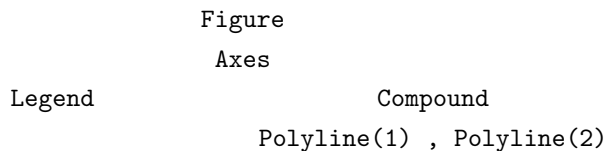


Figura 6: Albero relativo al disegno riportato in Figura 2.

### Esercizi

1. Riguardo alla procedura **Bisezione**: (a) spiegare perché se l'arrotondato del punto medio dell'ultimo intervallo coincide con uno degli estremi dell'intervallo stesso allora è inutile proseguire l'iterazione e (b) discutere l'efficacia del criterio d'arresto.
2. Sia  $u$  la precisione di macchina in  $F(2, 53)$ . Verificare che dopo l'assegnamento:

$$p = \text{poly}([1, u, -1], 'x')$$

il valore di  $p$  non è il polinomio monico  $q$  di radici  $1, u, -1$ . Discutere poi, utilizzando l'opportuna pagina dell'*help* di *Scilab*, il seguente dialogo:

```
-->coeff(p,0) == u
ans =
```

T

```
-->coeff(p,1) == -1
ans =
```

F

Infine, calcolare analiticamente  $p - q$  e verificare che  $q = \text{poly}([1, -1, u], 'x')$ .

3. Si consideri il polinomio  $q(t) = 2t^7 - 6t^4 + 8$ . Calcolare, utilizzando il comando **horner**, i valori  $p(2)$  e  $p(-8)$ .
4. Verificare che: per ogni  $\xi \in F(2, 53)$  esiste  $\theta \in \mathbb{R}$  tale che:

$$F(\xi) = f(\xi)(1 + \theta) \quad \text{e} \quad |\theta| < (1 + u)^{14} - 1$$

Dimostrare poi che  $(1 + u)^{14} - 1 < 1$  (e quindi che  $F(\xi)$  e  $f(\xi)$  hanno lo stesso segno).

5. Verificare che: se il calcolatore fosse in grado di calcolare i valori necessari della funzione  $f$ , otterremmo:

$$\text{Bisezione}(f, a, b) = \text{Bisezione}(F, a, b)$$

6. Sia  $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  una funzione continua tale che:

$$\max_{x \in [1.77; 2.23]} |f(x) - g(x)| \leq 10^{-9}$$

Stimare la massima distanza tra lo zero di  $f$  (che vale 2) ed uno zero di  $g$  (certamente esistente: spiegare perché). Utilizzare poi *Scilab* per tracciare grafici approssimati di  $f$ ,  $f + 10^{-9}$  e  $f - 10^{-9}$  su  $[1.77; 2.23]$  e spiegare come questi grafici possono essere utilizzati per stimare il risultato analitico ottenuto.

7. Modificare il disegno riportato in Figura 4 in modo da ottenere una griglia orizzontale di colore blu, la curva corrispondente al grafico di  $\sin x$  di colore verde, spessore 3 pixel e sovrapposta a quella corrispondente al grafico di  $\cos 2x$ .