**非線性控制**

**Nonlinear Control**

第八章作業

滑動模式控制

學號 : P46104285

研究生 : 楊亞勳

授課教授 : 楊憲東

Department of Aeronautics and Astronautics

National Cheng Kung University

Tainan, Taiwan, ROC

中華民國 111年 12月24日

目錄

[Question 1 1](#_Toc122268431)

[Question 2 4](#_Toc122268432)

[Question 3 8](#_Toc122268433)

[MATLAB Code 11](#_Toc122268434)

考慮下列之二階非線性系統

 (1a)

 (1b)

其中是控制訊號；和是不確定的參數，但滿足

 (2)

本題的目的是要設計滑動控制使得系統(1)相對於以下的滑動曲面為Lyapunov穩定

 (3)

# **Question 1**

試證明在不確定性參數、的作用下，能確保的滑動控制為

 (4)

其中

 (5)

 (6)

提示:參考8.4.3節的證明方法，先求出的表示式(利用(1)式)，將(4)式的帶入，再求的表示式，利用不等式層層化簡，得到關係式，其中可用常數、、表示之。

**Answer**

滑動控制屬於強健控制策略的一種，其核心為選定適當的滑動面(Sliding surface)，代表此系統最後所要進入的狀態。滑動面的數學符號為，為狀態追蹤誤差和時間的函數。在沒有時間限制的條件下，滑動面有者定理:若，則追蹤誤差及其各階導數皆趨近於0。

以上定理代表若一個系統在控制體的控制下，其維狀態變數能夠使得滑動面的值越小，代表追蹤誤差越小。而在沒有追蹤誤差收斂時間限制的情況下，在一維的相空間上，若存在滑動面或曲線，則此一曲線或曲面必須具備以下兩個條件:

1. 
2. ，當時

當存在時間限制時，條件(1)會轉換成

 (7)

在受控體有不確定性的情形下，可將系統的不確定性分為結構化不確定性(structures uncertainty)和非結構化不確定性(unstructured uncertainty)兩種。而結構化不確定性系統通常包含非結構化不確定性參數。此題滑動面已選定如式(3)，首先求得滑動面的一階導數

 (8)

式(8)第三行的整理，是為了分開含有結構不確定性參數和 的項次和未有結構化不確定性參數的項次。由於真實受控體含有不確定性參數，故無法準確求得控制律使得狀態維持在滑動面上，故控制律可選擇為式(4)，也就是。其中用來控制沒有結構化不確定性的項次，也就是；而切換控制則是用來控制未有不確定參數的項次。由式(7)化簡，此系統最終要達成的目標為

 (9)

觀察式(4)和式(8)，可將選擇為

 (10)

則可改寫成

 (11)

接著處理式(11)中的第一項以求得，且可將和分開處理。根據不等式，故

 (12)

 (13)

結合(12)和(13)，可如式(6)選擇為

 (14)

接著將式(9)、式(11)和式(14)結合，可得

 (15)

由(15)的推導可知，對照式(9)的可知。由此證明在不確定性參數、的作用下，能確保的滑動控制為

 (16)

此控制律能確保即使在不確定性參數和的作用下，狀態變數能在有限時間內收斂至滑動面上，且收斂時間為

 (17)

# **Question 2**

用MATLAB模擬以上滑動控制律的正確性。設定，並使和在區間內任意變化，每次模擬均取不一樣的和，例如，，或是取成之間的任意隨機亂數(利用MATLAB隨機亂數產生器)。用數值模擬驗證，當和在區間內任意變化時，滑動控制律(4)都可確保相平面軌跡進入滑動面，同時觀察是否有顫動現象伴隨發生。

**Answer**

為了確保以上控制律能夠有效地將系統控制到滑動面上。我們將進行MATLAB模擬。模擬的方式為先用數值求解器ode45，將各個時間的狀態求出，再用這些狀態求出各個時刻的控制訊號和滑動面變數的值。我們將結構化不確定性參數、分成四組，表1總結這四組模擬所使用的參數:

表 1、模擬參數總結

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 組別/參數 | 模擬時長 | 取樣頻率 |  |  |  |  |
| 第一組 | 10 s | 10000 Hz |  |  |  | 1 |
| 第二組 | 10 s | 10000 Hz |  |  |  | 1 |
| 第三組 | 10 s | 10000 Hz |  |  |  | 1 |
| 第四組 | 10 s | 10000 Hz |  |  |  | 1 |

這四組模擬所使用的初始值皆為，所得到的時間響應圖如圖1~4所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖1、第一組參數MATLAB模擬時間響應  、 | 圖2、第二組參數MATLAB模擬時間響應  、 |
|  |  |
| 圖3、第三參數MATLAB模擬時間響應  、 | 圖4、第四組參數MATLAB模擬時間響應  、 |

從圖1~4來看，由這四種方法產生結構化不確定性參數，所得到的模擬時間響應圖軌跡，並沒有太大的差別，四種方法的收斂時間幾乎相同，軌跡也幾乎相同，皆可漸進收斂至原點。

另一個值得討論的為這四組參數所產生的控制輸入時間響應圖。由於滑動控制中，會不斷切換控制訊號來讓狀態變數相對於滑動面在一個值的範圍內變動，而這個切換為不連續的，所以在控制訊號中能夠觀察到顫動(chattering)現象。圖5~8為這四組參數所得到的控制輸入時間響應圖。可以看到控制訊號從開始到過一段時間後，開始出現顫動現象，而到了平穩的階段後，這個顫動現象使控制輸入在之間來回跳動，這個跳動範圍大小和值有直接關係，在模擬時，有嘗試將調成不同大小的值，若是調成5，這個顫動的範圍會變成。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖5、第一組參數控制輸入時間響應  、 | 圖6、第二組參數控制輸入時間響應  、 |
|  |  |
| 圖7、第三參數控制輸入時間響應  、 | 圖8、第四組參數控制輸入時間響應  、 |

顫動效應除了可以在控制輸入訊號中找到，也可以在相平面軌跡中找到。圖9為第一組參數所得到的相平面軌跡圖，可以看到軌跡順利地從初始值位置漸進收斂至原點。圖9右半部為左圖的局部放大，觀察收斂至滑動面的部分，可以看到狀態變數不斷在和之間來回切換。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖9、第一組參數相平面軌跡圖、，右圖為局部放大。 | |

綜上所述，我們嘗試了四種不同產生結構化不確定性參數的方法，所得到的結果皆為系統的相對於原點漸進穩定，且軌跡非常相似。這四組模擬也都能看到顫動現象的發生。而為了測試此系統對不同初始值是否有同樣的控制能力，我們選擇了第一組參數作為模擬參數並測試了6個不同的初始值來觀察系統狀態變數也能收斂到原點。測試結果如圖10。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖10、不同初始值之相平面軌跡 | 圖11、不同初始值之相平面軌跡局部放大 |

由圖10觀察可以得知，不同的初始值皆可收斂至原點。而圖11為圖10在滑動曲線上的局部放大圖，也可以看到顫動現象的發生。

# **Question 3**

設定，重複上面步驟的模擬，並觀察顫動的情況有何改變。

**Answer**

此題要探討的是改變結構化不確定參數的界線範圍所造成的影響，亦即改變和中和的大小。為了方便模擬比較，在此採用第二小題中的第一組參數來進行模擬，差別在於。

表 2、 之模擬參數

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 組別/參數 | 模擬時長 | 取樣頻率 |  |  |  |  |
| 第一組 | 10 s | 10000 Hz |  |  |  | 1 |

在，也就是、的情況下，二維狀態變數的系統時間響應模擬結果如圖12所示，可以看到系統狀態變數隨著時間增加，也漸進收斂到0，對應於相平面軌跡圖則是原點的位置。

|  |
| --- |
|  |
| 圖12、系統 之狀態時間響應圖 |

而與之相應的系統控制輸入時間響應圖如圖13、14所示。由圖13可以看到系統可以在有限的時間內趨於穩定，而圖14為圖13在穩定區域的局部放大圖，可以看到控制輸入訊號在正負1之間切換，和時的相同，這是因為這個跳動範圍是被控制，故在相同的值下，跳動範圍相同，和和的大小無關。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖13、系統 之控制輸入時間響應 | 圖14、控制輸入時間響應局部放大 |

圖15、16則繪製出時的相平面軌跡圖和其局部放大。從圖15可以更清楚的看到系統從初始點釋放後，先往滑動面開始移動，而後在滑動面上往原點移動。在滑動面上往原點移動的過程，可由圖16局部放大觀察到顫動的現象。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖15、系統 之相平面軌跡圖 | 圖16、相平面軌跡圖局部放大 |

綜上所述，當時，系統也可以經由設計出的滑動控制律漸進收斂至原點。而為了進行直接的比較，圖17繪製出不同不確定參數的滑動面參數時間響應，兩個系統除了不確定性參數和的大小不同之外，其餘皆相同。由圖17觀察可以看出，當時，系統的收斂時間更快，乍看之下只要調高和的大小即可加快收斂速度，但其付出的代價可以由圖18看出，雖然當時的收斂速度更快，但是會產生很大的overshoot，而在收斂速度和overshoot之間的權衡則端看實際設計的需求。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖17、不同不確定參數的滑動面參數時間響應 | 圖18、不同不確定參數的控制輸入響應 |

圖19、20則繪製出兩個不同不確定性參數系統的狀態時間響應圖。圖19為狀態時間響應，圖20則是狀態。在這兩張圖也可以看出當時的收斂速度更快，但是有更大的overshoot，這個現象在圖20中尤其明顯。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖19、狀態時間響應 | 圖19、狀態時間響應 |

|  |
| --- |
| **MATLAB Code** |
| **Question 2** |
| %% Nonlinear Control HW8\_2  clc;  clear;  close all;    %% Initial Value  dt=0.0001;  t\_final=10;  t=0:dt:t\_final;  x1\_0=2;  x2\_0=2;  X0=[x1\_0;x2\_0];    %% Plot Parameter  LW = 1.6 ;  FS = 16 ;  FS\_lg = 18 ;    %% Calculate Results for Nonlinear\_System\_rand  [ t , X ] = ode45( @(t,X) Nonlinear\_System\_rand(X,t) , t, X0);  X=X';  for i =1:length(t)  [dX(:,i) , theta\_1(i) , theta\_2(i) , u(i) , s(i) ] = Nonlinear\_System\_rand(X(:,i),t(i)) ;  end    %% Plot State time response for Nonlinear\_System\_rand  figure(1)  plot(t, X(1,:), 'r', 'LineWidth', LW)  hold on  plot(t, X(2,:), 'b', 'LineWidth', LW)  hs(1)=legend({'$x\_1(t)$','$x\_2(t)$'},'Interpreter','latex');  ax(1)=gca;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('States $x\_1, x\_2 $','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(2)  plot(t,u,'-','Color','b','LineWidth',LW);  ax(2) = gca ;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Control Input $u(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(3)  plot(t,s,'b','LineWidth',LW)  ax(3)=gca;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Sliding Surface $S(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(4)  x1s=-3:0.1:3 ;  x2s=-2.\*x1s;  plot(x1s,x2s,'r--','LineWidth',LW)  hold on  plot(X(1,:),X(2,:),'b','LineWidth',LW)  plot(X(1,1),X(2,1),'bo','LineWidth',LW) ;  plot([-5 5],[0 0],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  plot([0 0],[-5 5],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  ax(4) = gca ;  xlabel('$x\_1$','Interpreter','Latex') % x label  ylabel('$x\_2$','Interpreter','Latex') % y label  axis([ -3 3 -4 4 ])  axis square  grid on    %% Calculate Results for Nonlinear\_System\_sinusoidal  [ t , X ] = ode45( @(t,X) Nonlinear\_System\_sin(X,t) , t, X0);  X=X';  for i =1:length(t)  [dX(:,i) , theta\_1(i) , theta\_2(i) , u(i) , s(i) ] = Nonlinear\_System\_sin(X(:,i),t(i)) ;  end    %% Plot State time response for Nonlinear\_System\_sin  figure(5)  plot(t, X(1,:), 'r', 'LineWidth', LW)  hold on  plot(t, X(2,:), 'b', 'LineWidth', LW)  hs(2)=legend({'$x\_1(t)$','$x\_2(t)$'},'Interpreter','latex');  ax(5)=gca;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('States $x\_1, x\_2 $','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(6)  plot(t,u,'-','Color','b','LineWidth',LW);  ax(6) = gca ;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Control Input $u(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(7)  plot(t,s,'b','LineWidth',LW)  ax(7)=gca;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Sliding Surface $S(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(8)  x1s=-3:0.1:3 ;  x2s=-2.\*x1s;  plot(x1s,x2s,'r--','LineWidth',LW)  hold on  plot(X(1,:),X(2,:),'b','LineWidth',LW)  plot(X(1,1),X(2,1),'bo','LineWidth',LW) ;  plot([-5 5],[0 0],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  plot([0 0],[-5 5],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  ax(8) = gca ;  xlabel('$x\_1$','Interpreter','Latex') % x label  ylabel('$x\_2$','Interpreter','Latex') % y label  axis([ -3 3 -4 4 ])  axis square  grid on    %% Calculate Results for Nonlinear\_System\_cos  [ t , X ] = ode45( @(t,X) Nonlinear\_System\_cos(X,t) , t, X0);  X=X';  for i =1:length(t)  [dX(:,i) , theta\_1(i) , theta\_2(i) , u(i) , s(i) ] = Nonlinear\_System\_cos(X(:,i),t(i)) ;  end    %% Plot State time response for Nonlinear\_System\_cos  figure(9)  plot(t, X(1,:), 'r', 'LineWidth', LW)  hold on  plot(t, X(2,:), 'b', 'LineWidth', LW)  hs(3)=legend({'$x\_1(t)$','$x\_2(t)$'},'Interpreter','latex');  ax(9)=gca;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('States $x\_1, x\_2 $','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(10)  plot(t,u,'-','Color','b','LineWidth',LW);  ax(10) = gca ;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Control Input $u(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(11)  plot(t,s,'b','LineWidth',LW)  ax(11)=gca;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Sliding Surface $S(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(12)  x1s=-3:0.1:3 ;  x2s=-2.\*x1s;  plot(x1s,x2s,'r--','LineWidth',LW)  hold on  plot(X(1,:),X(2,:),'b','LineWidth',LW)  plot(X(1,1),X(2,1),'bo','LineWidth',LW) ;  plot([-5 5],[0 0],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  plot([0 0],[-5 5],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  ax(12) = gca ;  xlabel('$x\_1$','Interpreter','Latex') % x label  ylabel('$x\_2$','Interpreter','Latex') % y label  axis([ -3 3 -4 4 ])  axis square  grid on    %% Calculate Results for Nonlinear\_System\_sin\_cos  [ t , X ] = ode45( @(t,X) Nonlinear\_System\_sin\_cos(X,t) , t, X0);  X=X';  for i =1:length(t)  [dX(:,i) , theta\_1(i) , theta\_2(i) , u(i) , s(i) ] = Nonlinear\_System\_sin\_cos(X(:,i),t(i)) ;  end    %% Plot State time response for Nonlinear\_System\_sin\_cos  figure(13)  plot(t, X(1,:), 'r', 'LineWidth', LW)  hold on  plot(t, X(2,:), 'b', 'LineWidth', LW)  hs(4)=legend({'$x\_1(t)$','$x\_2(t)$'},'Interpreter','latex');  ax(13)=gca;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('States $x\_1, x\_2 $','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(14)  plot(t,u,'-','Color','b','LineWidth',LW);  ax(14) = gca ;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Control Input $u(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(15)  plot(t,s,'b','LineWidth',LW)  ax(15)=gca;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Sliding Surface $S(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(16)  x1s=-3:0.1:3 ;  x2s=-2.\*x1s;  plot(x1s,x2s,'r--','LineWidth',LW)  hold on  plot(X(1,:),X(2,:),'b','LineWidth',LW)  plot(X(1,1),X(2,1),'bo','LineWidth',LW) ;  plot([-5 5],[0 0],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  plot([0 0],[-5 5],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  ax(16) = gca ;  xlabel('$x\_1$','Interpreter','Latex') % x label  ylabel('$x\_2$','Interpreter','Latex') % y label  axis([ -3 3 -4 4 ])  axis square  grid on    figure(17)  x1s=-3:0.1:3 ;  x2s=-2.\*x1s;  plot(x1s,x2s,'r--','LineWidth',LW)    %%  for i = 1:length(ax)  set(ax(i),'FontSize',FS,'FontName','Times New Roman')  end    for i = 1:length(hs)  set(hs(i),'FontSize',FS\_lg,'FontName','Times New Roman')  end  %% Nonlinear System uniform [-1 1]  function [dX, theta\_1,theta\_2,u,s]=Nonlinear\_System\_rand(X,t)  % Constant  a=1;  b=1;  b0=1;  x1=X(1);  x2=X(2);  s=(1+a)\*x1+x2; % Sliding Surface    u\_eq=-x1-(1+a)\*x2;  beta=a\*(1+a)\*abs(x1)+b\*x2^2+b0;  u=u\_eq-beta\*sign(s);    theta\_1=-1+2\*rand(1);  theta\_2=-1+2\*rand(1);    dx1=x2+theta\_1\*x1\*sin(x2);  dx2=theta\_2\*x2^2+x1+u;  dX=[dx1;dx2];  end    %% Nonlinear System sin [-1 1]  function [dX, theta\_1,theta\_2,u,s]=Nonlinear\_System\_sin(X,t)  % Constant  a=1;  b=1;  b0=1;  x1=X(1);  x2=X(2);  s=(1+a)\*x1+x2; % Sliding Surface    u\_eq=-x1-(1+a)\*x2;  beta=a\*(1+a)\*abs(x1)+b\*x2^2+b0;  u=u\_eq-beta\*sign(s);    theta\_1=sin(t);  theta\_2=sin(t);    dx1=x2+theta\_1\*x1\*sin(x2);  dx2=theta\_2\*x2^2+x1+u;  dX=[dx1;dx2];  end    %% Nonlinear System cos [-1 1]  function [dX, theta\_1,theta\_2,u,s]=Nonlinear\_System\_cos(X,t)  % Constant  a=1;  b=1;  b0=1;  x1=X(1);  x2=X(2);  s=(1+a)\*x1+x2; % Sliding Surface    u\_eq=-x1-(1+a)\*x2;  beta=a\*(1+a)\*abs(x1)+b\*x2^2+b0;  u=u\_eq-beta\*sign(s);    theta\_1=cos(t);  theta\_2=cos(t);    dx1=x2+theta\_1\*x1\*sin(x2);  dx2=theta\_2\*x2^2+x1+u;  dX=[dx1;dx2];  end    %% Nonlinear System sin\_cos [-1 1]  function [dX, theta\_1,theta\_2,u,s]=Nonlinear\_System\_sin\_cos(X,t)  % Constant  a=1;  b=1;  b0=1;  x1=X(1);  x2=X(2);  s=(1+a)\*x1+x2; % Sliding Surface    u\_eq=-x1-(1+a)\*x2;  beta=a\*(1+a)\*abs(x1)+b\*x2^2+b0;  u=u\_eq-beta\*sign(s);    theta\_1=sin(t);  theta\_2=cos(t);    dx1=x2+theta\_1\*x1\*sin(x2);  dx2=theta\_2\*x2^2+x1+u;  dX=[dx1;dx2];  end |
| **Question 3** |
| %% Nonlinear Control HW8\_3  clc;  clear;  close all;    %% Initial Value  dt=0.0001;  t\_final=10;  t=0:dt:t\_final;  x1\_0=2;  x2\_0=2;  X0=[x1\_0;x2\_0];    %% Plot Parameter  LW = 1.6 ;  FS = 16 ;  FS\_lg = 18 ;    %% Calculate Results for Nonlinear\_System\_rand  [ t1 , X1 ] = ode45( @(t,X) Nonlinear\_System\_rand\_ab1(X,t) , t, X0);  X1=X1';  for i =1:length(t1)  [dX1(:,i) , theta\_1\_1(i) , theta\_2\_1(i) , u1(i) , s1(i) ] = Nonlinear\_System\_rand\_ab1(X1(:,i),t1(i)) ;  end    [ t2 , X2 ] = ode45( @(t,X) Nonlinear\_System\_rand\_ab2(X,t) , t, X0);  X2=X2';  for i =1:length(t2)  [dX2(:,i) , theta\_1\_2(i) , theta\_2\_2(i) , u2(i) , s2(i) ] = Nonlinear\_System\_rand\_ab2(X2(:,i),t2(i)) ;  end    %% Plot State time response for Nonlinear\_System\_rand  figure(1)  plot(t, X2(1,:), 'r', 'LineWidth', LW)  hold on  plot(t, X2(2,:), 'b', 'LineWidth', LW)  hs(1)=legend({'$x\_1(t)$','$x\_2(t)$'},'Interpreter','latex');  ax(1)=gca;  title('$a=b=2$','Interpreter','Latex')  xlabel('Time (sec)')  ylabel('States $x\_1, x\_2 $','Interpreter','Latex')  ylim([-5 2.5])  axis normal  grid on    figure(2)  plot(t1,u2,'-','Color','b','LineWidth',LW);  hold on  plot(t1,u2,'-','Color','b','LineWidth',LW);  ax(2) = gca ;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Control Input $u(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on    figure(3)  x1\_s = -5:0.1:5 ;  x2\_s = -(1+2).\*x1\_s ;  plot(x1\_s,x2\_s,'r--','LineWidth',LW)  hold on  plot(X2(1,:),X2(2,:),'b','LineWidth',LW)  plot(X2(1,1),X2(2,1),'bo','LineWidth',LW) ;  plot([-5 5],[0 0],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  plot([0 0],[-6 6],'--','Color',[0.5 0.5 0.5],'LineWidth',LW) ;  ax(3) = gca ;  xlabel('$x\_1$','Interpreter','Latex')  ylabel('$x\_2$','Interpreter','Latex')  axis([-5 5 -6 6])  grid on  axis square      figure(4)  p(1)=plot(t1,s1,'r','LineWidth',LW);  hold on  p(2)=plot(t2,s2,'b','LineWidth',LW);  hs(2)=legend([p(1),p(2)],{'$a=b=1$','$a=b=2$'},'Interpreter','latex');  ax(4) = gca ;  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Sliding Surface $s$','Interpreter','Latex')  xlim([0 t\_final])  ylim([-1 9])  axis normal  grid on    figure(5)  p(3)=plot(t1,X1(1,:),'r','LineWidth',LW);  hold on  p(4)=plot(t1,X2(1,:),'b','LineWidth',LW);  hs(3)=legend([p(3),p(4)],{'$a=b=1$','$a=b=2$'},'Interpreter','latex');  ax(5) = gca ;  xlabel('Time (sec)') % x label  ylabel('State $x\_1(t)$','Interpreter','Latex') % y label  axis normal  grid on    figure(6)  p(5)=plot(t2,X1(2,:),'r','LineWidth',LW);  hold on  p(6)=plot(t2,X2(2,:),'b','LineWidth',LW);  hs(4)=legend([p(5),p(6)],{'$a=b=1$','$a=b=2$'},'Interpreter','latex');  ax(6) = gca ;  xlabel('Time (sec)') % x label  ylabel('State $x\_2(t)$','Interpreter','Latex') % y label  axis normal  grid on    figure(7)  p(7)=plot(t1,u1,'-','Color','r','LineWidth',LW);  hold on  p(8)=plot(t2,u2,'-','Color','b','LineWidth',LW);  ax(7) = gca ;  hs(5)=legend([p(7),p(8)],{'$a=b=1$','$a=b=2$'},'Interpreter','latex');  xlabel('Time (sec)')  ylabel('Control Input $u(t)$','Interpreter','Latex')  axis normal  grid on  %%  for i = 1:length(ax)  set(ax(i),'FontSize',FS,'FontName','Times New Roman')  end    for i = 1:length(hs)  set(hs(i),'FontSize',FS\_lg,'FontName','Times New Roman')  end  %% Nonlinear System  function [dX, theta\_1,theta\_2,u,s]=Nonlinear\_System\_rand\_ab1(X,t)  % Constant  a=1;  b=1;  b0=1;  x1=X(1);  x2=X(2);  s=(1+a)\*x1+x2; % Sliding Surface    u\_eq=-x1-(1+a)\*x2;  beta=a\*(1+a)\*abs(x1)+b\*x2^2+b0;  u=u\_eq-beta\*sign(s);    theta\_1=-1+2\*rand(1);  theta\_2=-1+2\*rand(1);    dx1=x2+theta\_1\*x1\*sin(x2);  dx2=theta\_2\*x2^2+x1+u;  dX=[dx1;dx2];  end    function [dX, theta\_1,theta\_2,u,s]=Nonlinear\_System\_rand\_ab2(X,t)  % Constant  a=2;  b=2;  b0=1;  x1=X(1);  x2=X(2);  s=(1+a)\*x1+x2; % Sliding Surface    u\_eq=-x1-(1+a)\*x2;  beta=a\*(1+a)\*abs(x1)+b\*x2^2+b0;  u=u\_eq-beta\*sign(s);    theta\_1=-2+4\*rand(1);  theta\_2=-2+4\*rand(1);    dx1=x2+theta\_1\*x1\*sin(x2);  dx2=theta\_2\*x2^2+x1+u;  dX=[dx1;dx2];  end |