

机器人系统设计

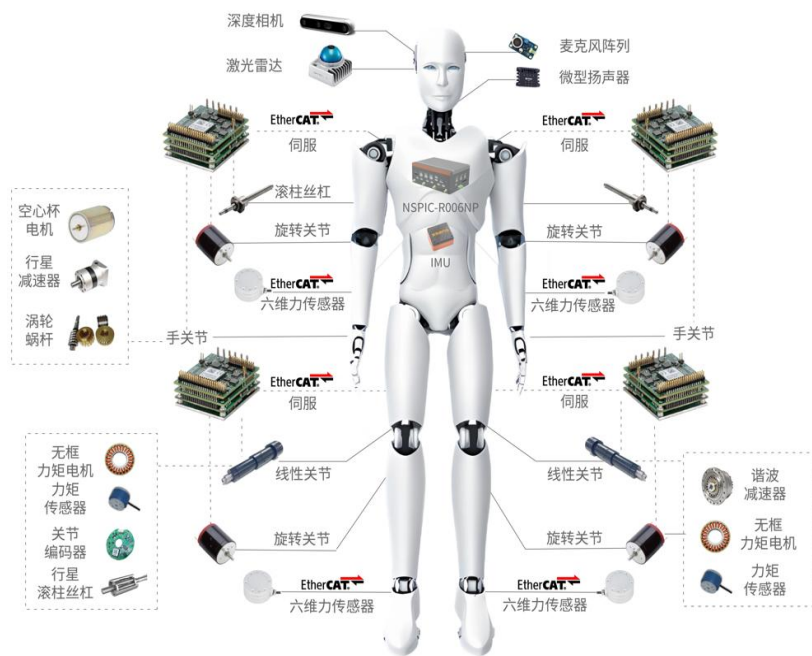
——课程介绍

主讲教师：吕光明/讲师

单位：人工智能学院机器人工程教研室

邮箱：lv0527@163.com

办公：重点实验室A座104、机械馆411、行政楼316



机器人系统设计

——第四章 机器人运动与控制

4.1 简介及移动机器人构型分析

课程目的

- 把移动机器人运动看成单纯控制问题。通过控制原理讲解，提升学生的移动机器人基础理论水平和专业技能。

建模



分析



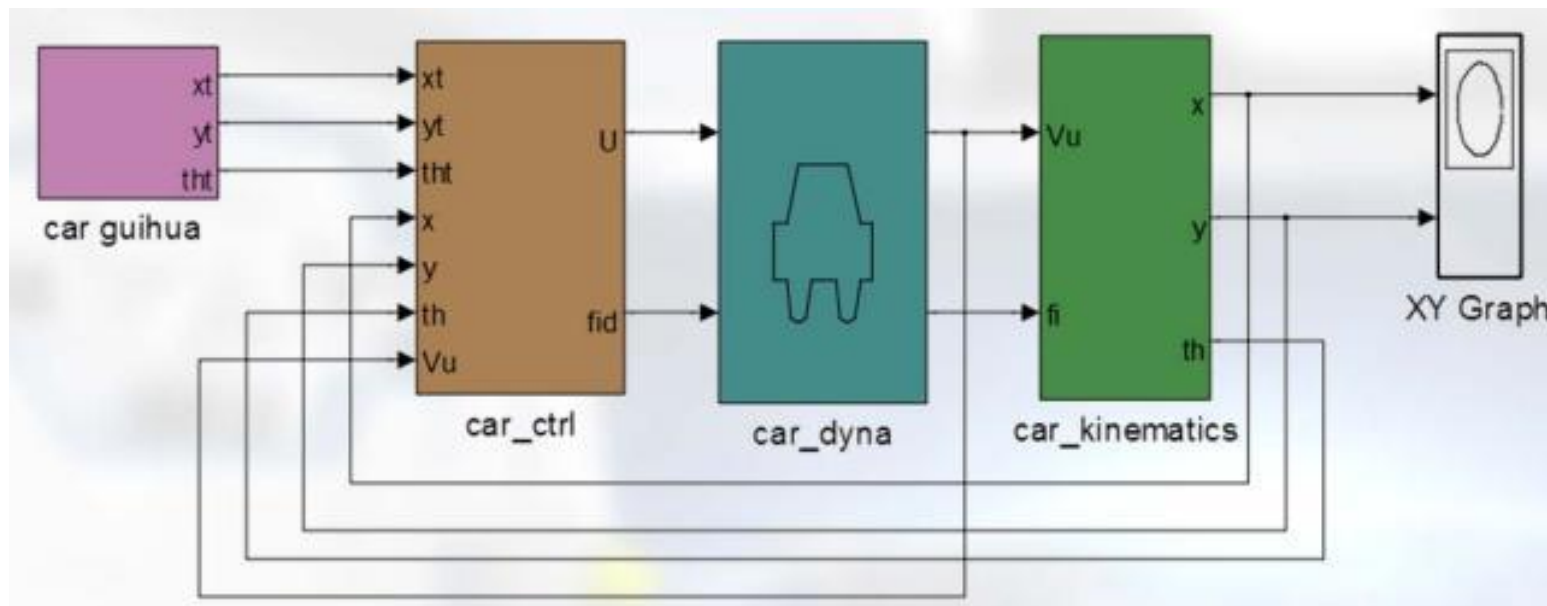
设计

1. 移动机器人运动控制的建模分析设计
2. Matlab特别是Simulink仿真技能训练

4.1 简介及移动机器人构型分析



> 课程目的



- > 在构建小车运动曲线规划、运动学、动力学、控制器模型的基础上，完成小车跟踪曲线仿真

4.1 简介及移动机器人构型分析



控制系统设计流程

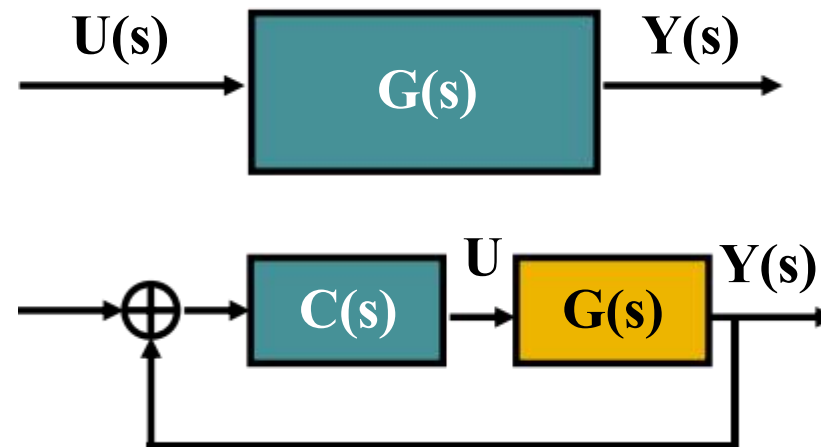
确定控制目标



建立系统模型



系统分析
控制器设计






4.1 简介及移动机器人构型分析

一、移动机器人构型(1)





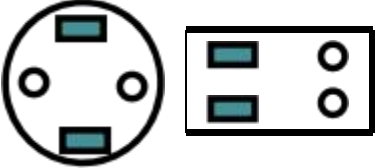
4.1 简介及移动机器人构型分析

一、移动机器人构型(2)

轮子数目	构型	描述	典型例子
2		后轮驱动 前轮转向	自行车 摩托车
3		后轮驱动 前轮转向	三轮车
4		后轮驱动 前轮转向	小轿车


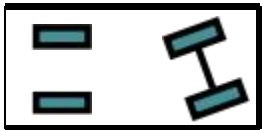

4.1 简介及移动机器人构型分析

一、移动机器人构型(3)

轮子数目	构型	描述	典型例子
2		双轮差速驱动	平衡车 坦克
3		后轮差速驱动, 前全向轮支撑	室内 机器人
4		双轮差速驱动, 全向支撑轮两个	室内 机器人

4.1 简介及移动机器人构型分析

一、移动机器人构型(4)

轮子数目	构型	描述	典型例子
4		前轮驱动 前轮转向	前轮驱动 机器人
4		四轮驱动 前轮转向	四驱 越野汽车
3、4		3或者4个 全向动力轮	室内 机器人

4.1 简介及移动机器人构型分析

一、移动机器人构型(5)



(1) Car-Like

后轮驱动前轮转向



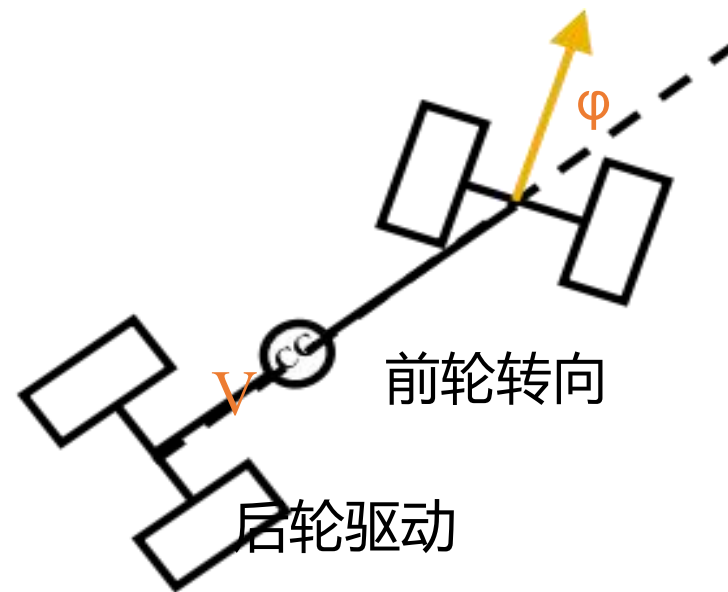
(2) Tank-Like

双轮差速驱动

4.1 简介及移动机器人构型分析

Car-Like移动机器人(6)

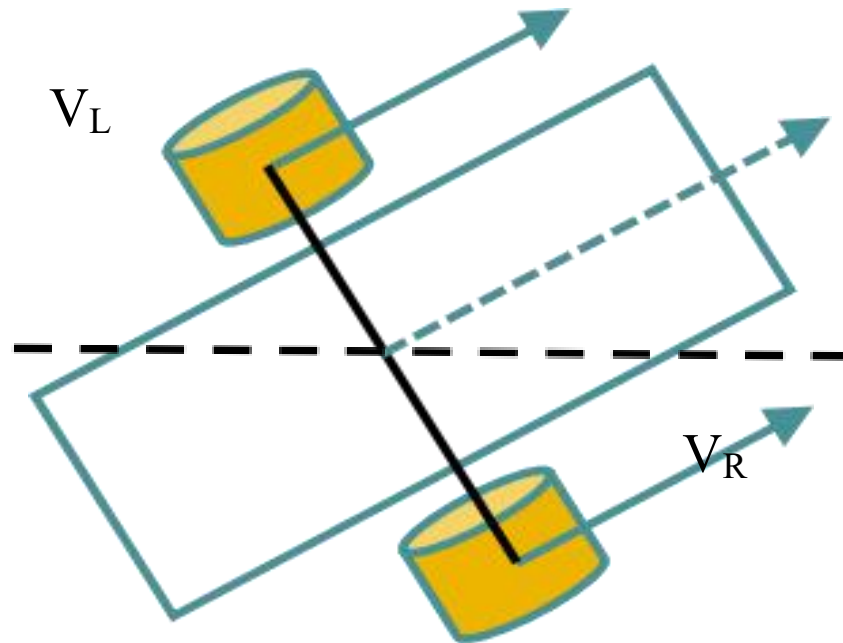
- Car-Like小车，由直流电机通过减速齿轮带动后轮旋转驱动小车以速度 V 前进；由舵机驱动前轮转向，转向角为 φ 。



4.1 简介及移动机器人构型分析

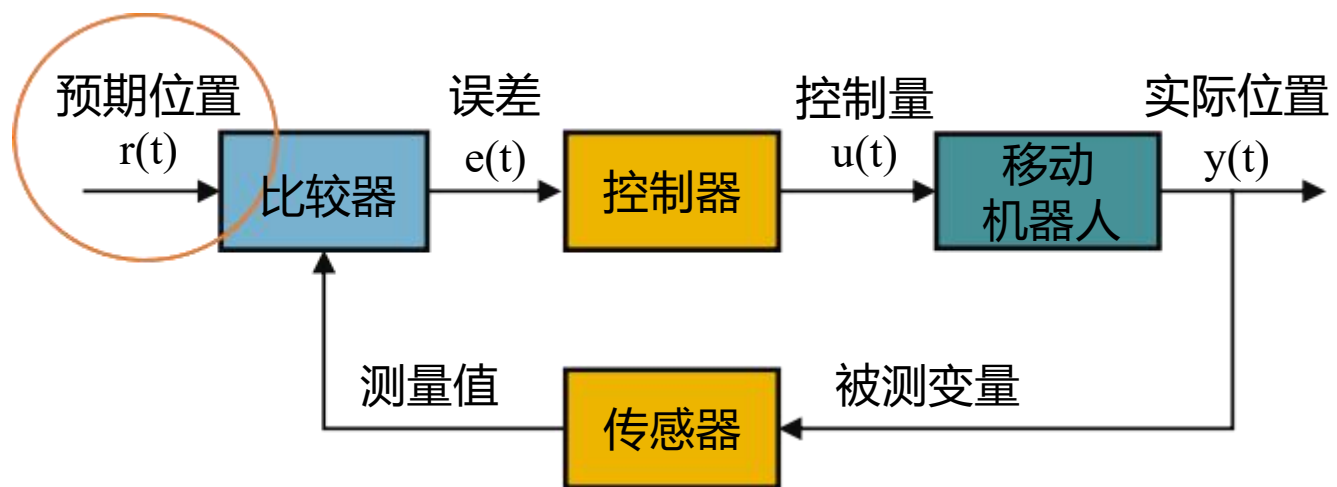
Tank-Like移动机器人(7)

- 两个直流电机分别通过减速齿轮带动左右轮旋转，左轮前向速度为 V_L ，右轮前向速度为 V_R 。



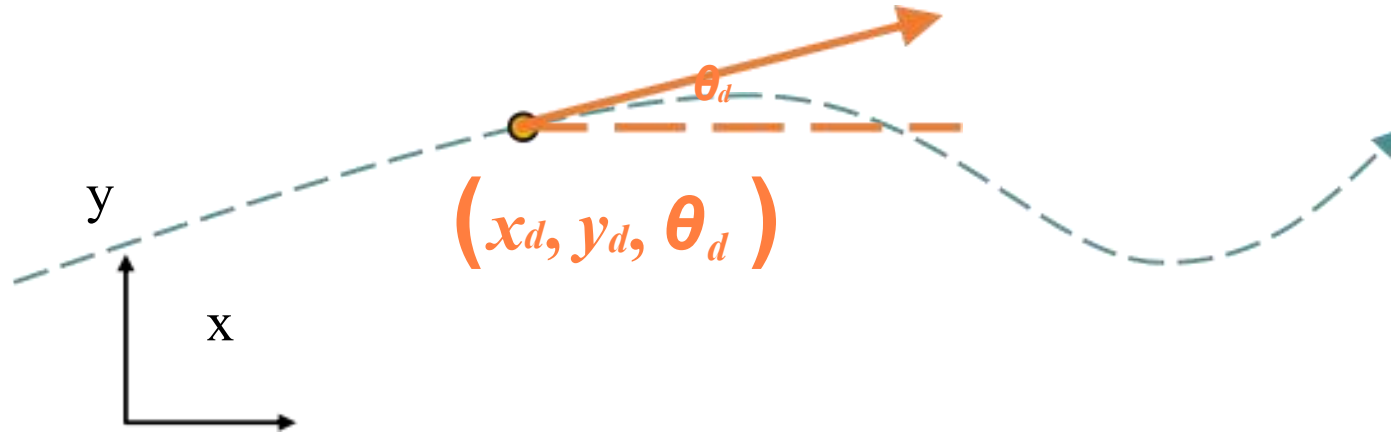
4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

移动机器人平面曲线规划(1)



4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

移动机器人平面曲线规划(1)



$$\theta_d = a \tan \left(\frac{\dot{y}_d}{\dot{x}_d} \right)$$

4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

移动机器人平面曲线规划(2)

》！我们假设移动机器人在类似平面的场地上，跟踪期望曲线运动。期望曲线如何生成呢？

$$(x_d, y_d, \theta_d) \quad \theta_d = \text{atan}(\dot{y}_d / \dot{x}_d)$$

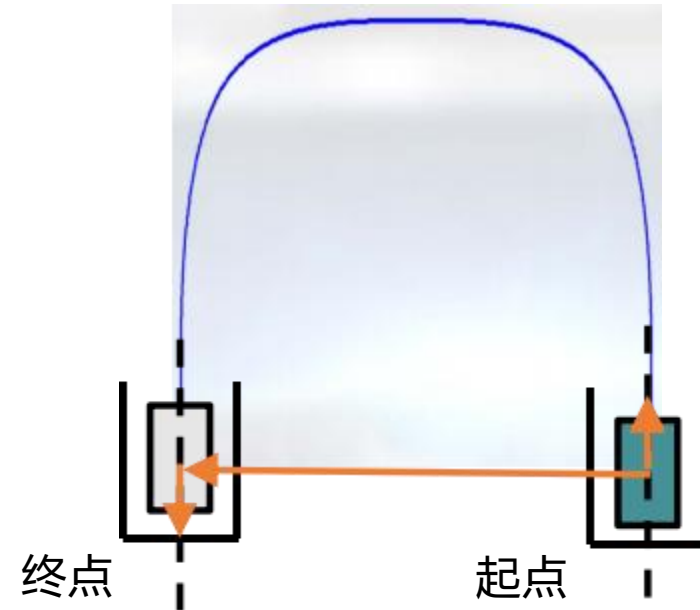
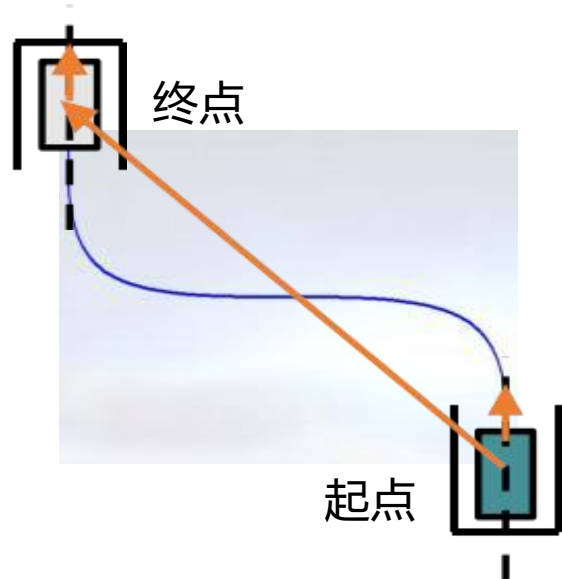


4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

移动机器人平面曲线规划(3)

小车移库问题

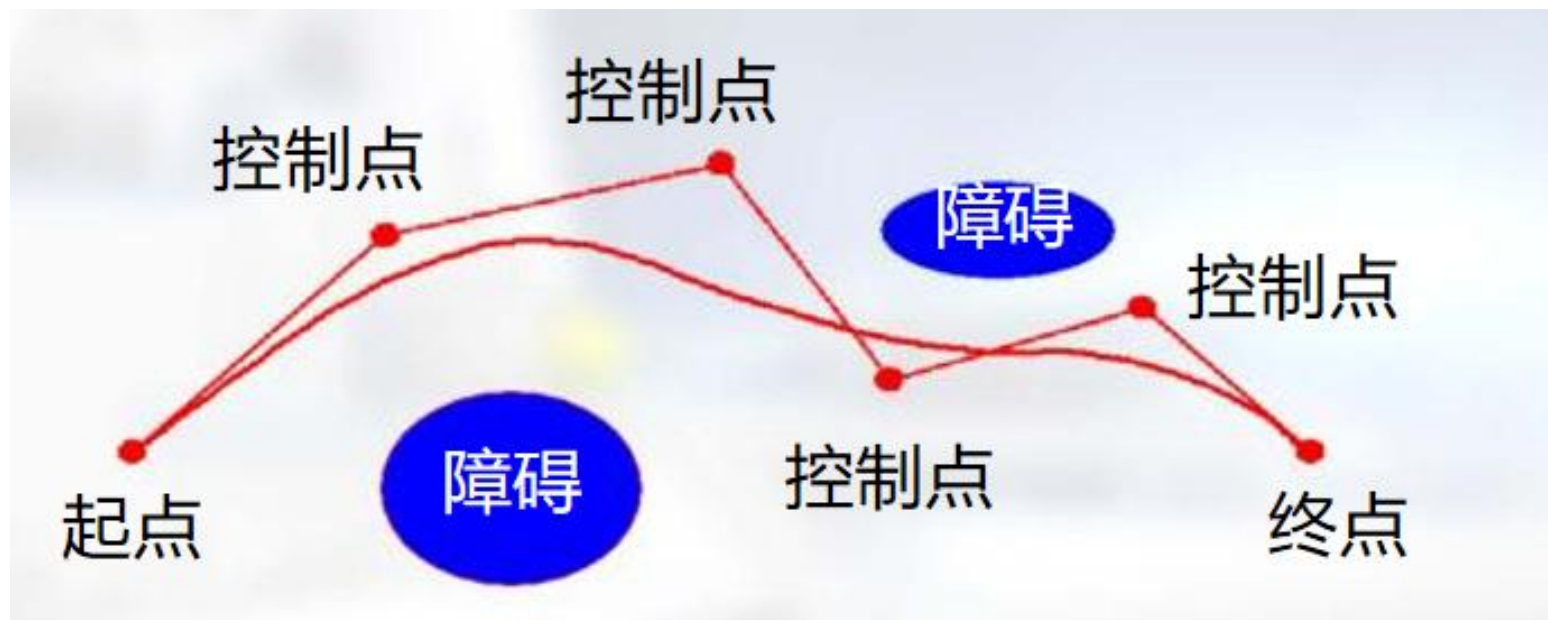
➤ 规划一条由**起点**出发；到达**终点**的光滑曲线



4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

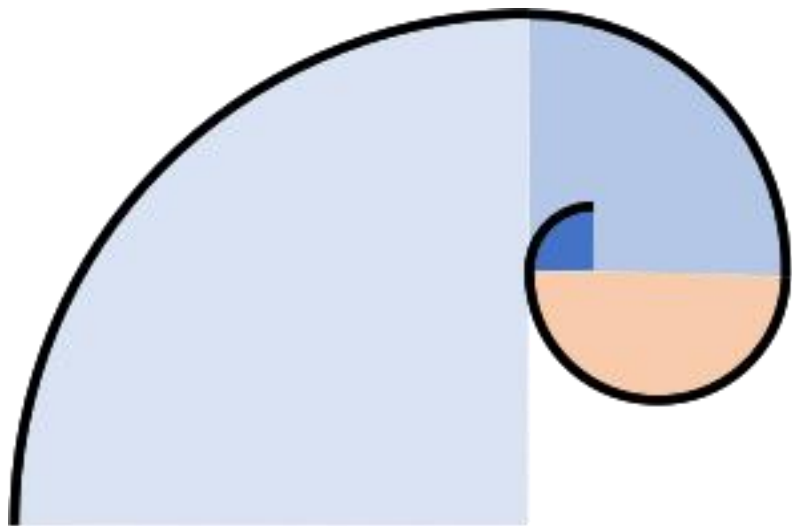
移动机器人平面曲线规划(4)

》规划一条由起点到终点，合乎要求光滑曲线。给定一组控制点而得到一条曲线，曲线大致形状由这些点予以控制。一般用得多是**三次B样条曲线**



4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

移动机器人平面曲线规划(5)



➤ 样条曲线的简单理解



思考题：这样曲线适合作为小车曲线规划吗？



4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

移动机器人平面曲线规划(6)

》平面曲线规划，机器人位置可以用其二维组坐标(x,y)的参数方程描述。

$$P = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{bmatrix}$$

》其中参数可以是时间t，也可以是归一化路程s。

$$\theta = a \tan \left(\frac{\dot{y}(t)}{\dot{x}(t)} \right) = a \tan \left(\frac{\dot{y}(s)}{\dot{x}(s)} \right)$$

归一化路程 s 的本质是“相对路程”，通过将实际路程与参考基准对比得到。

参考基准通常是总路程（如从起点到终点的全程距离）。

计算公式：

$s = \text{实际行驶路程} / \text{总路程}$

（最常用场景），特殊场景可选用最大可能路程、标准路程作为基准。



4.2 平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

四个控制点的B样条曲线(2)

- 》 给定四个控制点 $[C_1, C_2, C_3, C_4]$, 则样条曲线为 $P(s)$, 参数 s 满足 $0 \leq s \leq 1$, 可以看成是归一化路程。

四个控制点

$$C_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}, C_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix}, C_4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \end{bmatrix}$$

四个样条函数

$$f_1(s), f_2(s), f_3(s), f_4(s)$$

$$f_1(s) = \frac{1}{6}(1-s)^3$$

$$f_2(s) = \frac{1}{6}(3s^3 - 6s^2 + 4)$$

$$f_3(s) = \frac{1}{6}(-3s^3 + 3s^2 + 3s + 1)$$

$$f_4(s) = \frac{1}{6}s^3$$



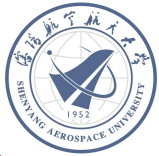
4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

四个控制点的B样条曲线(2)

- 》 给定四个控制点 $[C_1, C_2, C_3, C_4]$, 则样条曲线为 $P(s)$, 参数 s 满足 $0 \leq s \leq 1$, 可以看成是归一化的路程。

平面轨迹 ($0 \leq s \leq 1$)

$$P(s) = f_1(s) C_1 + f_2(s) C_2 + f_3(s) C_3 + f_4(s) C_4$$



4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

四个控制点的B样条曲线(3)

%演示四个控制点B样条曲线生成

%demomooc1.m

%四个控制点C=[C1 C2 C3 C4]

```
C=[0 1 2 3  
    0 1 1 0];
```

```
s=0:0.01:1;
```

%归一化路程 $0 \leq s \leq 1$

%四个样条函数

```
f1s=(1-s).^3/6;
```

```
f2s=(3*s.^3-6*s.^2+4)/6;
```

```
f3s=(-3*s.^3+3*s.^2+3*s+1)/6;
```

```
f4s=s.^3/6;
```

%四个控制点的B样条曲线

```
Ps=C(:,1)*f1s+C(:,2)*f2s+...
```

```
C(:,3)*f3s+C(:,4)*f4s;
```

%绘制控制点及B样条曲线

```
figure(1)
```

```
plot(C(1,:),C(2,:), 'r*', Ps(1,:), Ps(2,:), 'b');
```

```
legend('控制点','B样条曲线')
```

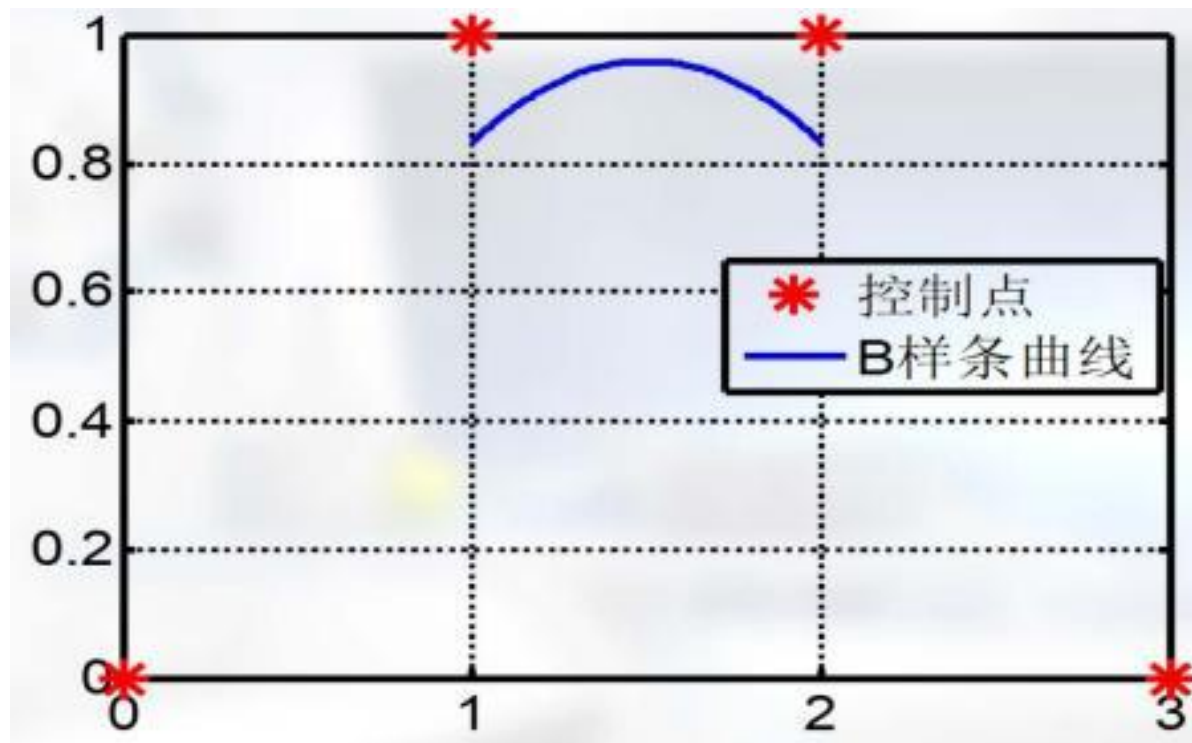
```
title('四个控制点及其B样条曲线')
```

```
grid on
```

4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

四个控制点的B样条曲线(4)

四个控制点的B样条曲线



4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

五个控制点的B样条曲线(1)

如果给定五个控制点 $[C_1, C_2, C_3, C_4, C_5]$,则决定了两条样条曲线为 $P_1(s), P_2(s)$ 。

$$P_1(s) = f_1(s) C_1 + f_2(s) C_2 + f_3(s) C_3 + f_4(s) C_4 \quad (0 \leq s \leq 1)$$

$$P_2(s) = f_1(s) C_2 + f_2(s) C_3 + f_3(s) C_4 + f_4(s) C_5 \quad (0 \leq s \leq 1)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}, C_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix}, C_4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \end{bmatrix}, C_5 = \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \end{bmatrix}$$



4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

五个控制点的B样条曲线(2)

%演示五个控制点两段B样条曲线生成

%demomooc2.m

%五个控制点C=[C1 C2 C3 C4 C5]

C=[0 1 2 3 4
0 1 0 1 0];

s=0:0.01:1; **%归一化路程 $0 \leq s \leq 1$**

%四个样条函数

f1s=(1-s).^3/6;

f2s=(3*s.^3-6*s.^2+4)/6;

f3s=(-3*s.^3+3*s.^2+3*s+1)/6;

f4s=s.^3/6;

%计算两段样条曲线

P1s=C(:,1)*f1s+C(:,2)*f2s+C(:,3)*f3s+C(:,4)*f4s;

P2s=C(:,2)*f1s+C(:,3)*f2s+C(:,4)*f3s+C(:,5)*f4s;

%绘制控制点及B样条曲线

figure(1);

plot(C(1,:),C(2,:), 'r*', P1s(1,:), P1s(2,:), 'b', P2s(1,:), P2s(2,:), 'c');

legend('控制点','第一段','第二段')

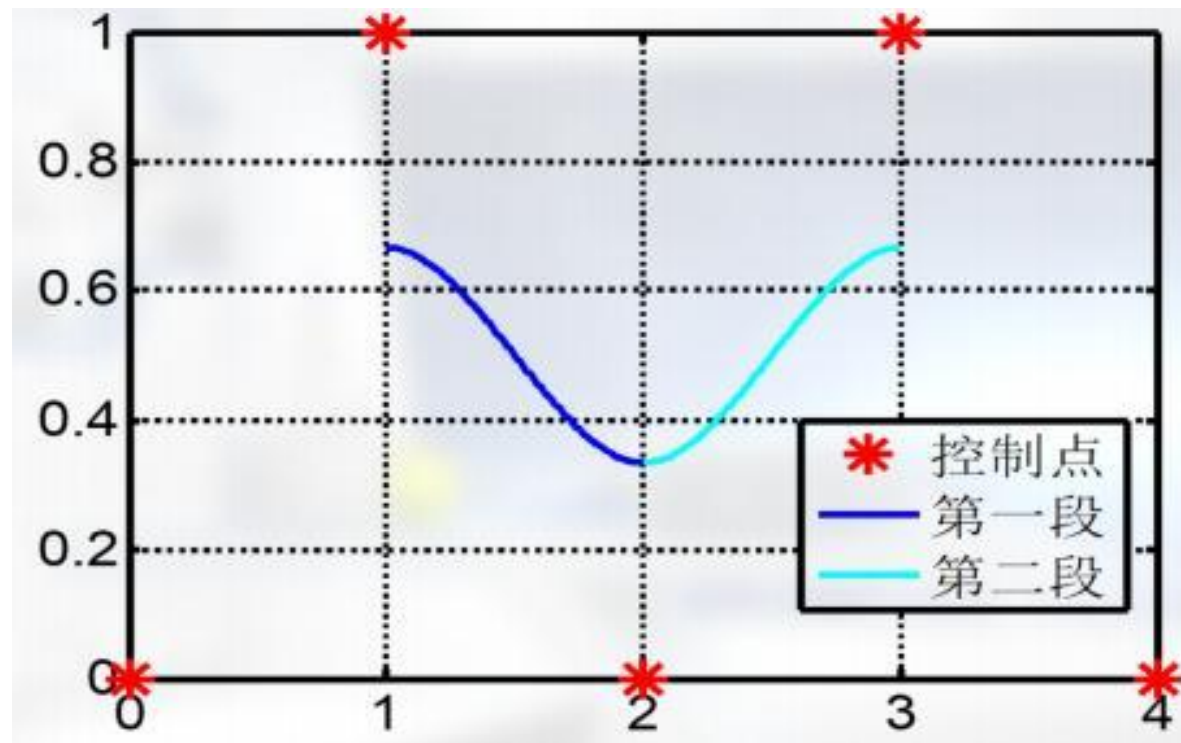
title('五个控制点及其B样条曲线')

grid on

4.2 平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

五个控制点的B样条曲线(3)

五个控制点的B样条曲线





4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

N个控制点的B样条曲线(1)

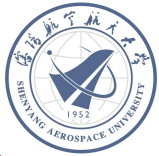
➤ 如果给定N个控制点 $[C_1, C_2, C_3, \dots, C_N]$,则决定了(N-3)条样条曲线为 $P_1(s), P_2(s), \dots, P_{(N-3)}(s)$

$$P_1(s) = f_1(s) C_1 + f_2(s) C_2 + f_3(s) C_3 + f_4(s) C_4$$

$$P_2(s) = f_1(s) C_2 + f_2(s) C_3 + f_3(s) C_4 + f_4(s) C_5$$

⋮

$$P_{N-3}(s) = f_1(s) C_{N-3} + f_2(s) C_{N-2} + f_3(s) C_{N-1} + f_4(s) C_N$$



4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

N个控制点的B样条曲线(2)

%演示N个控制点B样条曲线生成

%demomoo3.m

%N个控制点C=[C1 C2 C3 C4 ... CN]

```
C=[0    1    2   -2   -1    0  
    0  0.3  2.5   2.5  4.7   5];
```

```
N=length(C);    %控制点数目
```

```
s=0:0.01:1;    %归一化路程
```

```
f1s=(1-s).^3/6; %四个样条函数
```

```
f2s=(3*s.^3-6*s.^2+4)/6;
```

```
f3s=(-3*s.^3+3*s.^2+3*s+1)/6;
```

```
f4s=s.^3/6;
```

%绘制控制点及B样条曲线

```
figure(1); mycolor='mbc' ;
```

```
plot(C(1,:),C(2,:), 'r*'); hold on;
```

```
for i=1:N-3
```

```
    P=C(:,i)*f1s+C(:,i+1)*f2s+...
```

```
        C(:,i+2)*f3s+C(:,i+3)*f4s;
```

```
    plot(P(1,:),P(2,:), ...
```

```
        mycolor(mod(i,3)+1));
```

```
end
```

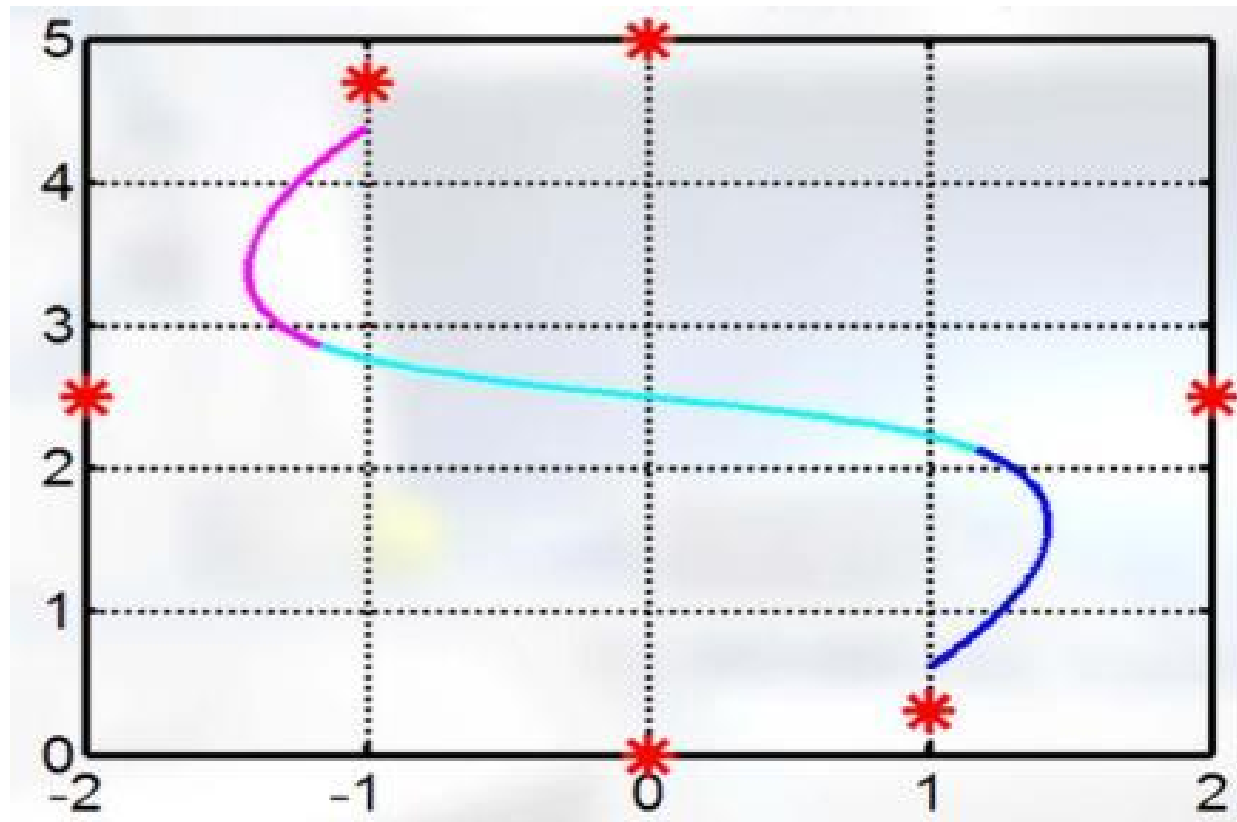
```
title('N个控制点及其B样条曲线')
```

```
grid on; hold off
```

4.2平面曲线规划—N个控制点的B样条曲线

N个控制点的B样条曲线(3)

N个控制点的B样条曲线





4.3过起点和终点的B样条曲线

B样条曲线的速度和加速度

$$P(s) = \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{bmatrix} \quad V(s) = \frac{\partial P(s)}{\partial s} = \begin{bmatrix} v_x(s) \\ v_y(s) \end{bmatrix} \quad A(s) = \frac{\partial^2 P(s)}{\partial s^2} = \begin{bmatrix} a_x(s) \\ a_y(s) \end{bmatrix}$$

》! 样条函数的微分

$$f_1(s) = (1-s)^3 / 6$$

$$f_2(s) = (3s^3 - 6s^2 + 4) / 6$$

$$f_3(s) = (-3s^3 + 3s^2 + 3s + 1) / 6$$

$$f_4(s) = s^3 / 6$$

$$v_1(s) = -(1-s)^2 / 2$$

$$v_2(s) = 3s^2 / 2 - 2s$$

$$v_3(s) = -3s^2 / 2 + s + 1/2$$

$$v_4(s) = s^2 / 2$$

$$a_1(s) = 1 - s$$

$$a_2(s) = 3s - 2$$

$$a_3(s) = 1 - 3s$$

$$a_4(s) = s$$



4.3过起点和终点的B样条曲线

B样条曲线的速度和加速度

》！B样条曲线 $P(s)$ 的速度和加速度也是参数 s 函数

$$P(s) = f_1(s)C_1 + f_2(s)C_2 + f_3(s)C_3 + f_4(s)C_4$$

$$V(s) = v_1(s)C_1 + v_2(s)C_2 + v_3(s)C_3 + v_4(s)C_4$$

$$A(s) = a_1(s)C_1 + a_2(s)C_2 + a_3(s)C_3 + a_4(s)C_4$$

4.3过起点和终点的B样条曲线

B样条曲线连接点光滑性

任意前后两段B样条曲线的连接点是光滑连续的

$$P_1(s) = f_1(s)C_1 + f_2(s)C_2 + f_3(s)C_3 + f_4(s)C_4$$

$$P_2(s) = f_1(s)C_2 + f_2(s)C_3 + f_3(s)C_4 + f_4(s)C_5$$

前一段曲线终点与后一段曲线起点在位置、速度和加速度上连续

$$P_1(1) = P_2(0) = 1/6 * C_2 + 2/3 * C_3 + 1/6 * C_4$$

$$V_1(1) = V_2(0) = -1/2 * C_2 + 1/2 * C_4$$

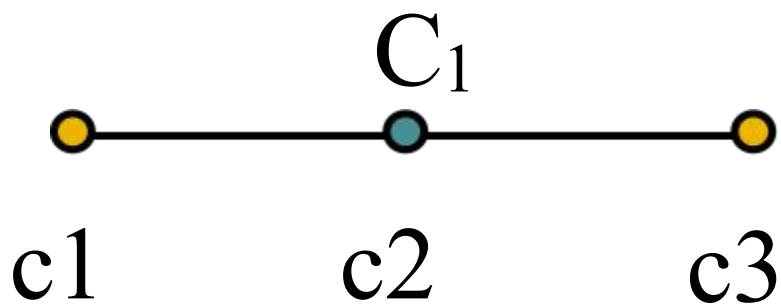
$$A_1(1) = A_2(0) = C_2 - 2 * C_3 + C_4$$

4.3过起点和终点的B样条曲线

过起点的B样条曲线(1)

给定控制点 $[C_1 C_2 \dots C_N]$ ，如何保证 $P(S)$ 过起点 C_1 ？

通过增加额外控制点来保证 $P(s)$ 过起点 C_1



$$c_1 = C_1 - V_1 * L$$

$$c_2 = C_1$$

$$c_3 = C_1 + V_1 * L$$

V_1 表示小车过 C_1 速度方向的单位向量

L 为适合正常数 可以取为小车车长一半

4.3过起点和终点的B样条曲线

过起点的B样条曲线(2)

》! 给定控制点 $[c_1, c_2, \dots, c_n]$, 样条曲线起点

$$P_1(0) = 1/6 * c_1 + 2/3 * c_2 + 1/6 * c_3 \quad c_1 = C_1 - V_1 * L$$

$$V_1(0) = -1/2 * c_1 + 1/2 * c_3 \quad c_2 = C_1$$

$$A_1(0) = c_1 - 2 * c_2 + c_3 \quad c_3 = C_1 + V_1 * L$$

$$P_1(0) = C_1$$

$$V_1(0) = V_1 * L$$

$$A_1(0) = 0$$

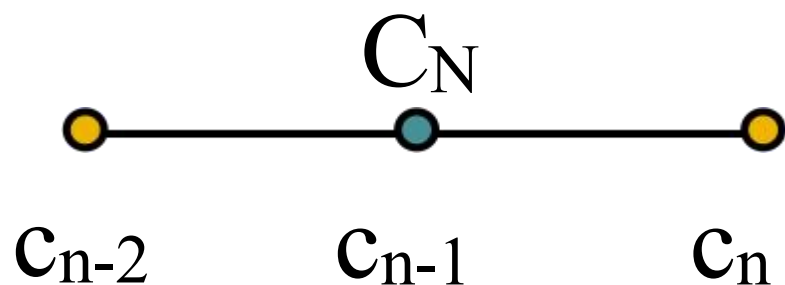
过起点为 C_1 ,
速度方向为 V_1

4.3过起点和终点的B样条曲线

过终点的B样条曲线(1)

给定控制点 $[C_1, C_2, \dots, C_N]$, 如何保证 $P(s)$ 过终点 C_N ?

通过增加额外控制点来保证 $P(s)$ 过终点 C_N



$$C_{n-2} = C_N - V_N * L$$

$$C_{n-1} = C_N$$

$$C_n = C_N + V_N * L$$

如果给定控制点 $[C_1, C_2, \dots, C_N]$, 如何保证 $P(s)$ 过终点 C_N ?



4.3过起点和终点的B样条曲线

过终点的B样条曲线(2)

给定控制点 $[c_1, c_2, \dots, c_N]$ 样条曲线终点

$$P_{n-3}(1) = 1/6 * C_{n-2} + 2/3 * C_{n-1} + 1/6 * C_n$$

$$V_{n-3}(1) = -1/2 * C_{n-2} + 1/2 * C_n$$

$$A_{n-3}(1) = C_{n-2} - 2 * C_{n-1} + C_n$$

$$c_{n-2} = C_N - V_N * L$$

$$c_{n-1} = C_N$$

$$c_n = C_N + V_N * L$$

$$P_{n-3}(1) = C_N$$

$$V_{n-3}(1) = V_N * L$$

$$A_{n-3}(1) = 0$$



过终点 C_N ,
速度方向为 V_N

4.3过起点和终点的B样条曲线

过起点和终点的B样条曲线(1)

- 给定初始N个控制点 $[C_1, C_2, \dots, C_N]$, 如何保证过起点和终点?

通过增加额外控制点来保证过起点 C_1 和终点 C_N

- 原来的控制点:

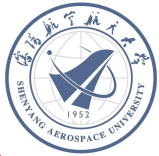
$$C = [C_1, C_2, \dots, C_{N-1}, C_N]$$

- 增广后的控制点:

$$RC = [C_1 - V_1 * L, C_1, C_1 + V_1 * L, C_2, \dots, C_{N-1}, C_N - V_N * L, C_N, C_N + V_N * L]$$



V_1 为 C_1 速度方向; V_N 为 C_N 速度方向



4.3过起点和终点的B样条曲线

过起点和终点的B样条曲线(2)

%演示N个控制点B样条曲线生成demomooc4.m

%N个控制点C=[C1 C2 C3 C4 ... CN]

```
C=[0    1    2   -2   -1    0  
    0  0.3  2.5  2.5  4.7  5];
```

V1=[1;0]; %起点C1出发速度方向V1,

V2=[1;0]; %到终点CN速度方向V2,

L=0.254/2; %2L为小车长度

NC=length(C); %原始控制点数



4.3过起点和终点的B样条曲线

过起点和终点的B样条曲线(2)

➤ %增加控制点保证过起点和终点，起点速度方向V1，终点速度方向V2

```
RC=[C(:,1)-V1*L,C(:,1),C(:,1)+V1*L,C(:,2:NC-1), ...  
    C(:,NC)-V2*L,C(:,NC),C(:,NC)+V2*L];
```

```
N=length(RC); %控制点扩充后的控制点数目  
s=0:0.01:1; %归一化路程  
f1s=(1-s).^3/6; %四个样条函数f1(s)  
f2s=(3*s.^3-6*s.^2+4)/6; %f2(s)  
f3s=(-3*s.^3+3*s.^2+3*s+1)/6; %f3(s)  
f4s=s.^3/6; %f4(s)
```

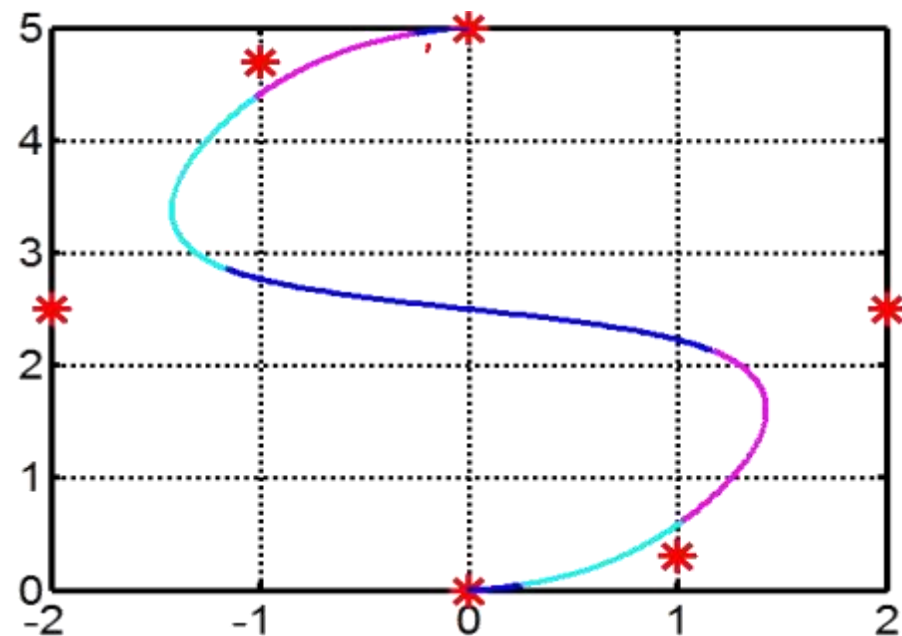
4.3过起点和终点的B样条曲线

过起点和终点的B样条曲线(3)

➤ %绘制过起点和终点B样条曲线

```
figure(1); mycolor='mbc' ;  
plot(RC(1,:),RC(2,:), 'r*');  
hold on; for i=1:N-3  
    P=RC(:,i)*f1s+RC(:,i+1)*f2s+RC(:,i+2)*f3s+RC(:,i+3)*f4s;  
    plot(P(1,:),P(2,:),mycolor(mod(i,3)+1));  
end  
title('过起点和终点的B样条曲线');  
grid on;  
hold off
```

➤ 过起点和终点的B样条曲线





4.3过起点和终点的B样条曲线

过任意控制点的B样条曲线

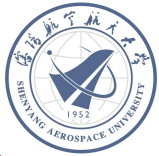
给定N 个控制点 $[C_1, C_2, \dots, C_N]$ 如何保证过中间的某个控制点 C_k ?

》! 原来的控制点: $C = C_1, \dots, C_{k-1}, C_k, C_{k+1}, \dots, C_N$

》! 增广后的控制点:

$$RC = C_1, \dots, C_{k-1}, C_k - V_k * L, C_k, C_k + V_k * L, C_{k+1}, \dots, C_N$$

V_k 为过 C_k 时的速度方向单位向量



4.3过起点和终点的B样条曲线

作业：3

分析题：三次多项式曲线与B样条曲线的区别，以及适用的场景？

4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

轨迹曲线的曲率(1)

➤! 曲线曲率 K 是曲线弯曲程度一种度量,曲率 K 越大曲线 越弯曲,小车跟踪更为困难...

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{\dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\dot{y}(t)}{\left(\sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2}\right)^3} = \frac{\dot{x}(s)\ddot{y}(s) - \ddot{x}(s)\dot{y}(s)}{\left(\sqrt{\dot{x}(s)^2 + \dot{y}(s)^2}\right)^3}$$

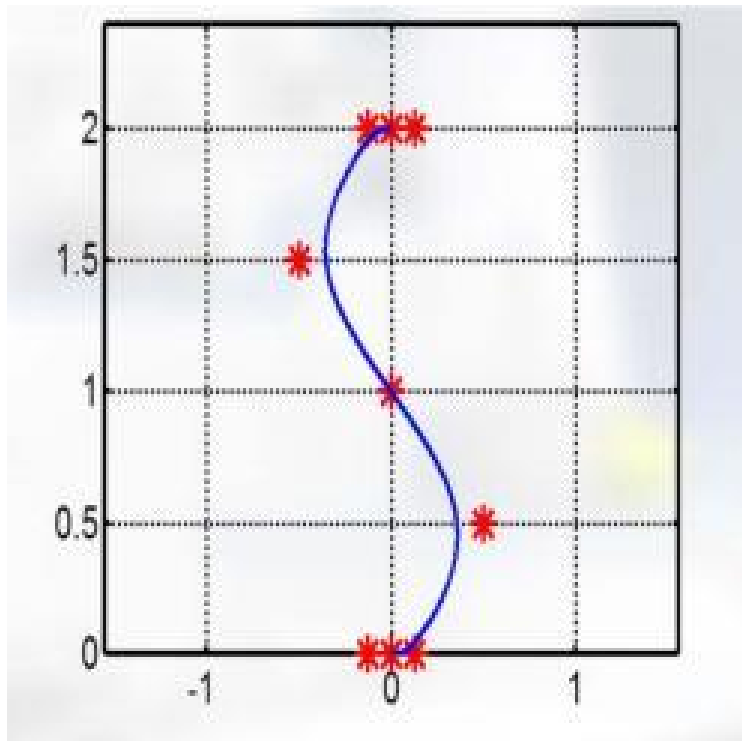


可以用曲线曲率 K 评价轨迹曲线的好坏

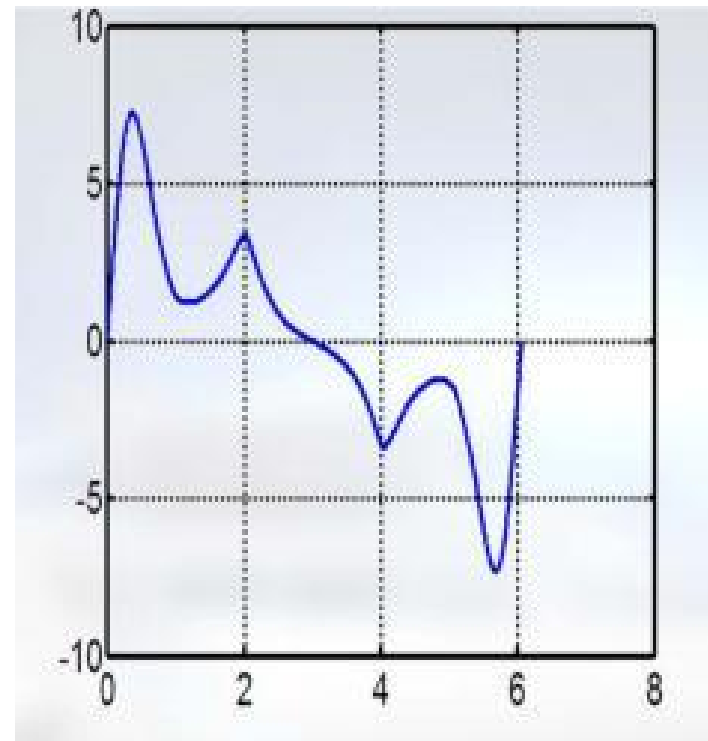
4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

轨迹曲线的曲率(2)

N个控制点
及其B样条曲线



B样条曲线的
曲率 $K=1/R$



4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

轨迹曲线的曲率(3)

》例如车长为 L 的Car-Like小车，其最大转向曲率小于

$$\kappa \leq \frac{\tan \phi_{\max}}{L}$$

ϕ_{\max} 前轮的最大转向角



轨迹曲率越大，表示小车轨迹越弯曲，跟踪更为困难...

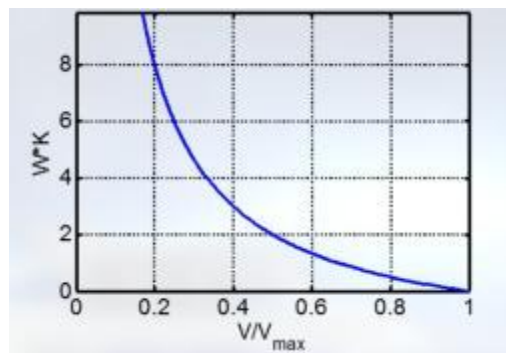
4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

轨迹曲线的曲率(4)

》例如车宽为W的Tank-Like小车，其最大转向曲率为

$$\kappa \leq \frac{2}{W} \left[\frac{V_{\max}}{V} - 1 \right]$$

指定速度V下的转向曲率

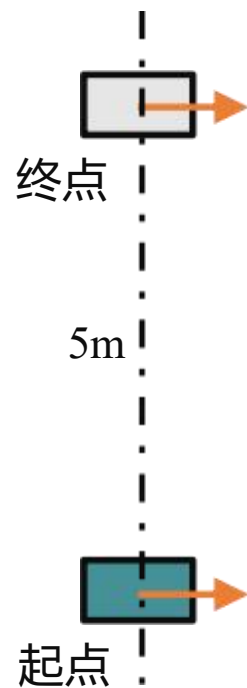


轨迹曲率越大，表示小车轨迹越弯曲，跟踪更为困难 ...

4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

演示控制点与曲线生成(1)

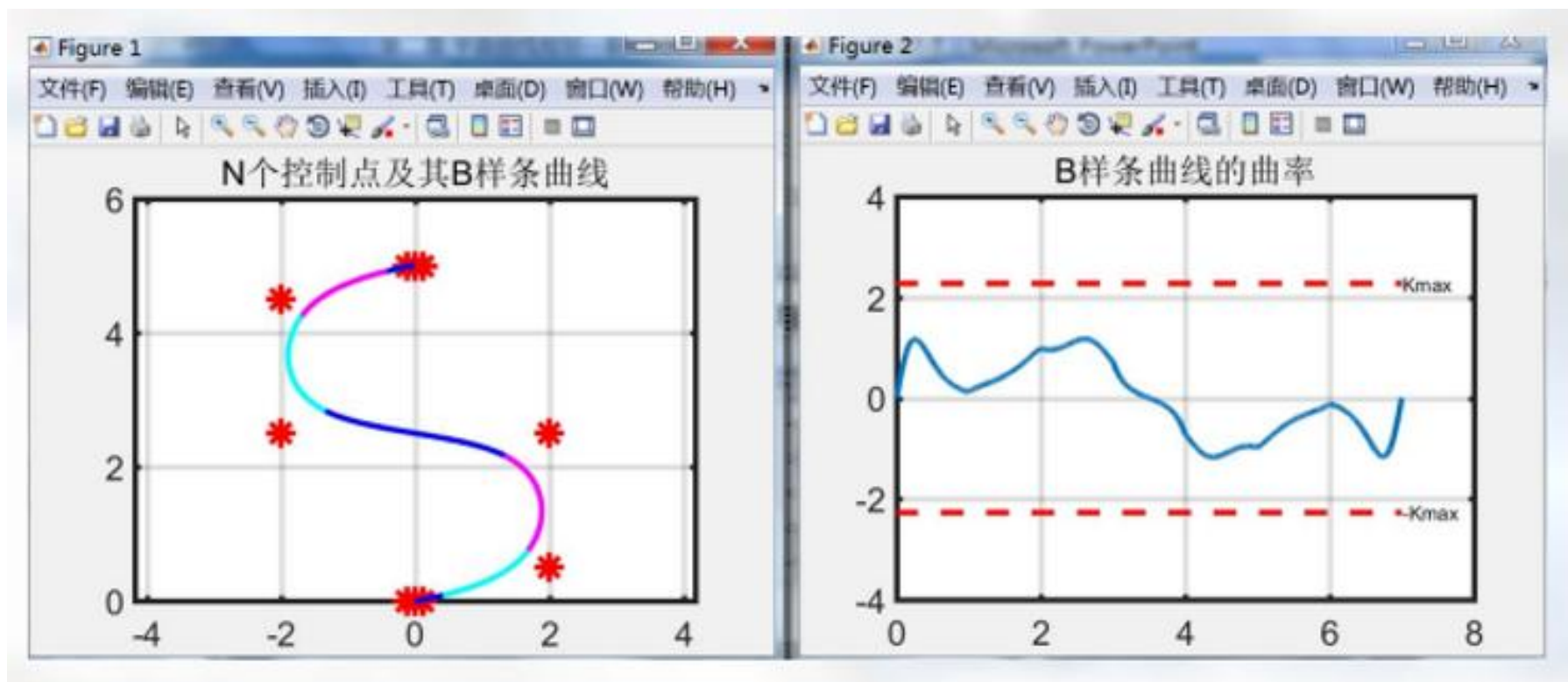
小车移库问题
demomooc5.m



4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

演示控制点与曲线生成(2)

通过控制控制点的位置，改变B样条曲线的曲率





4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

参数s与参数时间t的关系(1)

》! 前面小车平面轨迹我们都是用参数s计算的。

》! 但小车平面轨迹用时间参数t描述，更符合习惯

$$P(s) = \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = P(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}$$

4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

参数s与参数时间t的关系(1)

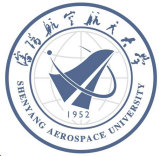
其速度为：

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\partial P(s)}{\partial s} \dot{s} \Rightarrow \begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x(s) \\ v_y(s) \end{bmatrix} \dot{s}(t)$$

$$V(t) = V(s) \dot{s}$$



例如我们可以通过设定期望小车速度 $|V(t)|=\text{常值}$,
更容易刻画小车**沿轨迹曲线匀速运动特性**



4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

参数s与参数时间t的关系(2)

》 小车速度用参数t和用参数s描述，有

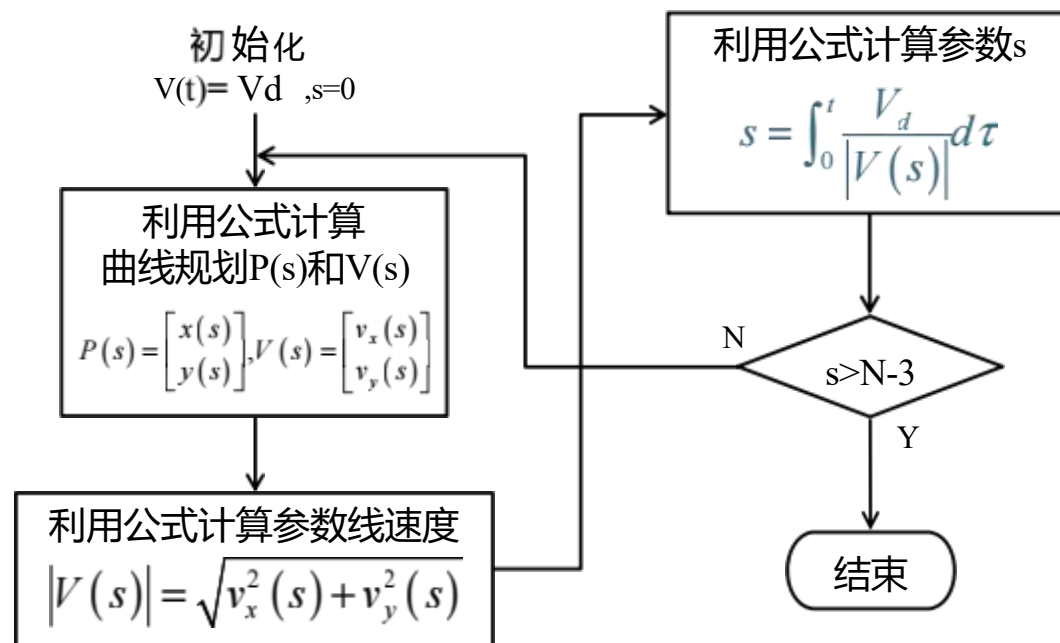
$$|V(t)| = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)} \quad |V(s)| = \sqrt{v_x^2(s) + v_y^2(s)}$$

》 显然： $|V(t)| = |V(s)| s.(t)$

， 则可以通过下式计算参数s $s = \int_0^t \frac{|V(\tau)|}{|V(s)|} d\tau$

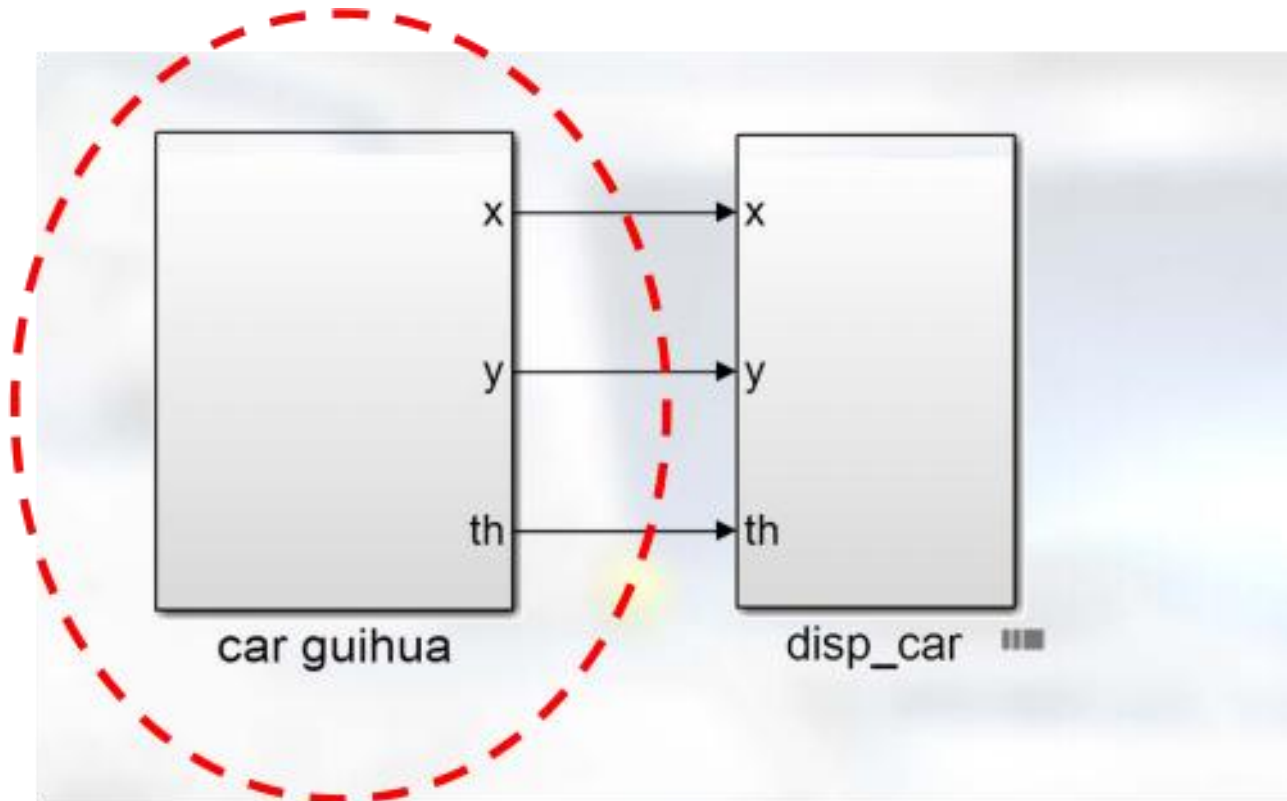
4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

参数s与参数时间t的关系(3)



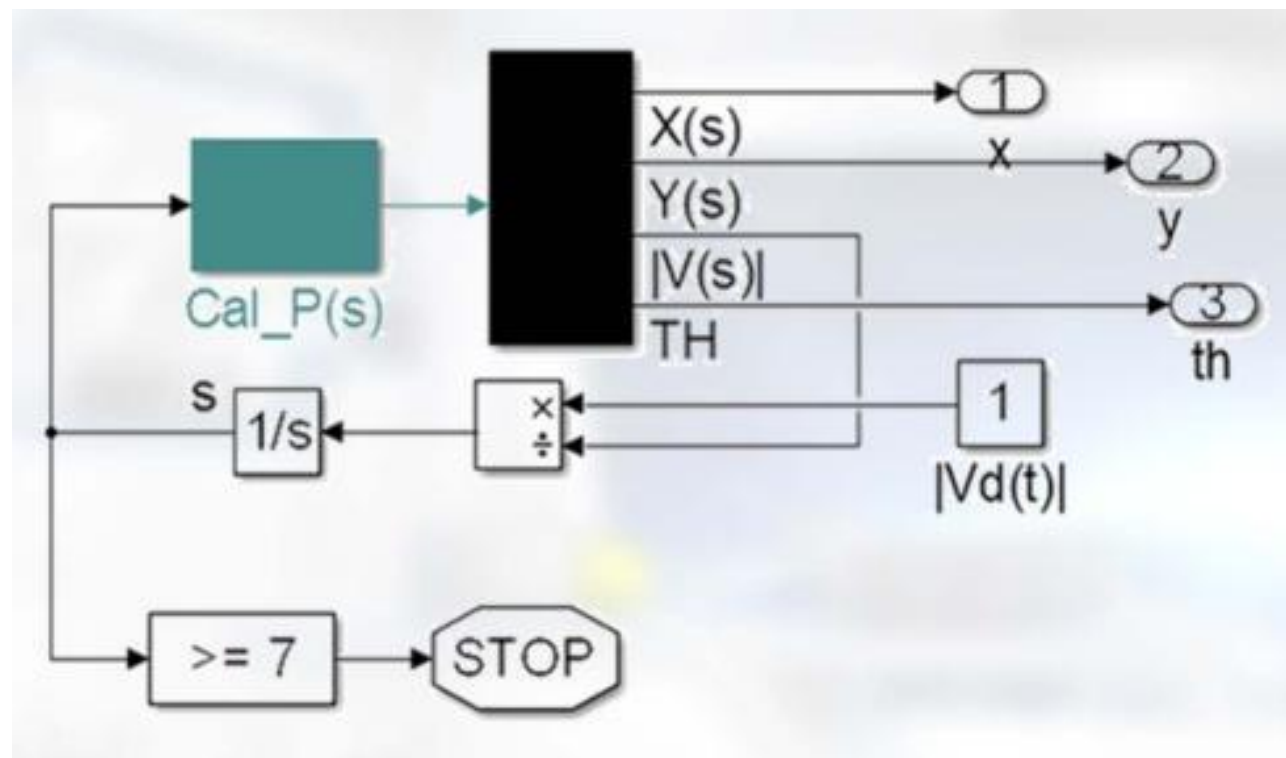
4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

编制小车曲线规划Simulink模块(1)



4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

编制小车曲线规划Simulink模块(2)



小车曲线规划模块

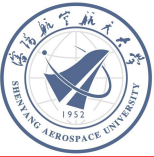


4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

编制小车曲线规划Simulink模块(3)

```
function P=cal_P(s)
%输入s: B样条曲线参数s
%输出P:[x(s);y(s);|V(s)|;theta(s)]
C=[0    2    2    -2    -2    0 %原始控制点
    0    0.5  2.5  2.5  4.5  5];
V1=[1;0]; V2=[1;0]; L=0.254; %起点终点速度方向
NC=length(C);
%增加控制点, 保证过起点和终点
RC=[C(:,1)-V1*L,C(:,1),C(:,1)+V1*L,C(:,2:NC-
1),C(:,NC)- V2*L,C(:,NC),C(:,NC)+V2*L];
N=length(RC);
OUT=0;
```

```
if(s>=N-3)
    I=N-4;
    OUT=1;
    dt=s-(N-3); s=1;
else
    I=fix(s);
    s=mod(s,1);
end
```



4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

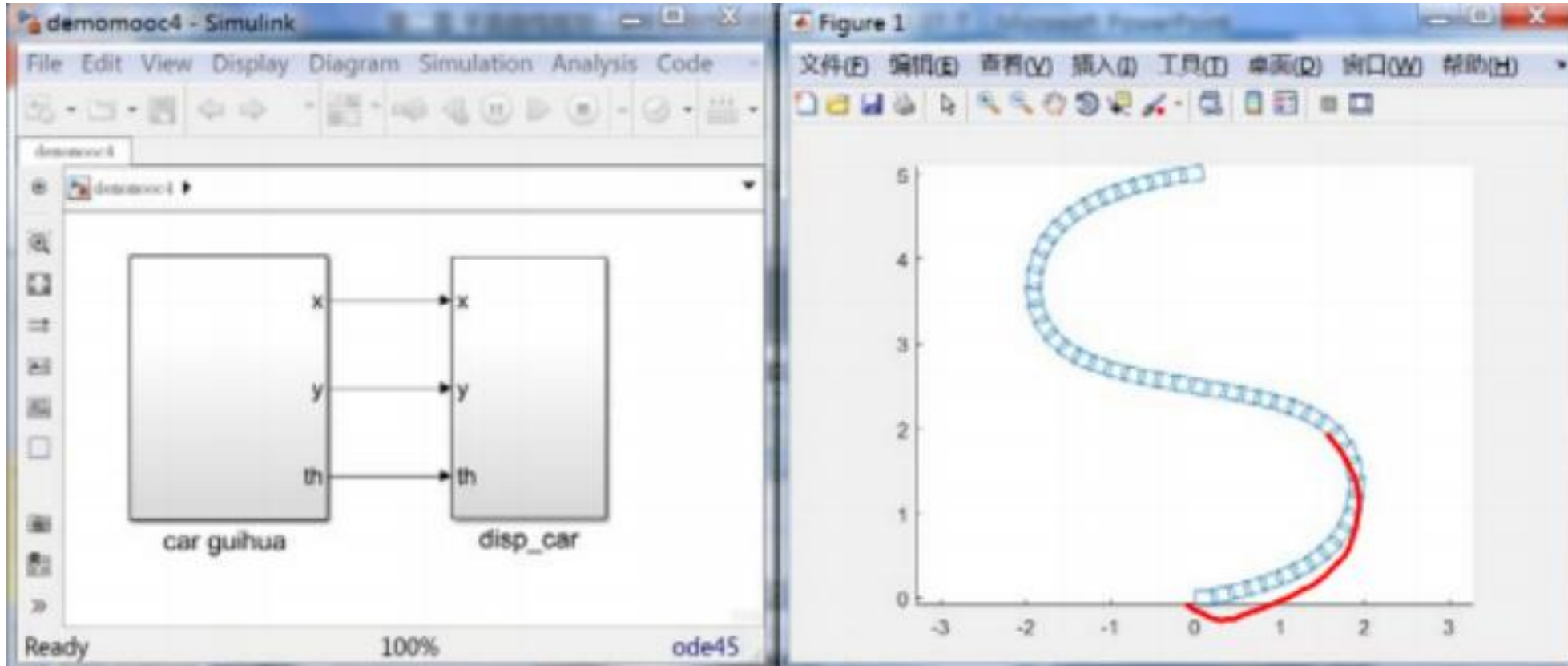
编制小车曲线规划Simulink模块(4)

```
f1=(1-s).^3/6;  
f2=(3*s.^3-6*s.^2+4)/6;  
f3=(-3*s.^3+3*s.^2+3*s+1)/6;  
f4=s.^3/6;  
d1 =-1/2*(1-s)^2;  
d2 =3/2*s^2-2*s;  
d3 =-3/2*s^2+s+1/2;  
d4 =1/2*s^2;  
a1 = 1-s;  
a2 = 3*s-2;  
a3 = -3*s+1;  
a4 = s;  
%
```

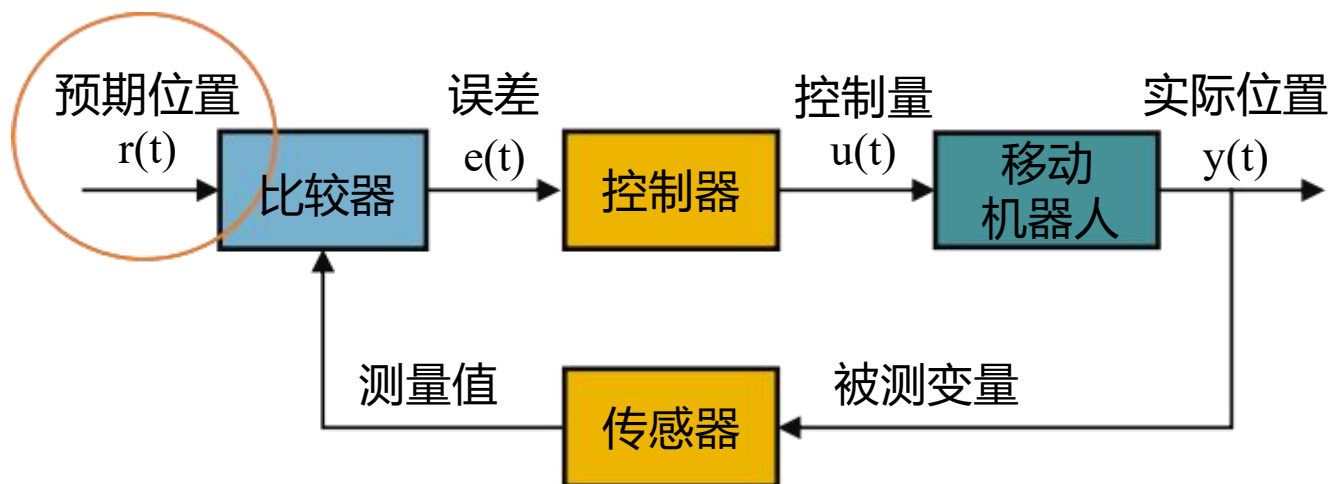
```
P(:,1)=f1*RC(:,I+1)+f2*RC(:,I+2)+f3*RC(:,I+3)+f4*RC(:,I+4);  
V(:,1)=d1*RC(:,I+1)+d2*RC(:,I+2)+d3*RC(:,I+3)+d4*RC(:,I+4);  
A(:,1)=a1*RC(:,I+1)+a2*RC(:,I+2)+a3*RC(:,I+3)+a4*RC(:,I+4);  
vv=sqrt(V(1,1)^2+V(2,1)^2);  
angle=atan2(V(2,1),V(1,1));  
if(OUT==1)  
    P=P+V*dt;  
end  
P=[P;vv;angle];
```


4.4平面曲线规划—B样条曲线的曲率slider2

编制小车曲线规划Simulink模块(5)



移动机器人平面曲线规划总结(1)



移动机器人平面曲线规划总结(2)



$$(x_d, y_d, \theta_d)$$

$$\theta_d = a \tan \left(\frac{\dot{y}_d}{\dot{x}_d} \right)$$

移动机器人平面曲线规划总结(3)

➤ (1) 曲线曲率

$$K = \frac{\dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\dot{y}(t)}{\left(\sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2}\right)^3} = \frac{\dot{x}(s)\ddot{y}(s) - \ddot{x}(s)\dot{y}(s)}{\left(\sqrt{\dot{x}(s)^2 + \dot{y}(s)^2}\right)^3} \leq K_{\max}$$

➤ (2) 参数s计算

$$s = \int_0^t \frac{v(\tau)}{v(s)} d\tau$$

$$0 \leq s \leq N-3$$

移动机器人平面曲线规划总结(4)

