

Research on the Application of Mobile Robot in the Course of Automatic Control Principle

Chuan Ji

Shandong Jiao Tong University, School of Aeronautics, Jinan, Shandong, 250357, China

Email: allen_ji@hotmail.com

Abstract

This paper mainly discusses the application of mobile robot in the course of automatic control principle. Based on the background of measurement and control technology and instrument specialty, the dynamic system modeling and trajectory tracking controller design of mobile robot are taken as the main tasks. The theoretical applications of dynamic system modeling and PID controller design are mainly introduced, and the simulation is carried out by using MATLAB robot toolbox, which reflects the characteristics of close combination of control courses with professional background. The application of mobile robot car can make students integrate theory with practice in learning and apply what they have learned.

Keywords: Automatic Control; Tracking Control; PID Control

移动机器人在自动控制原理教学中的应用研究*

冀川

山东交通学院航空学院, 山东济南 250357

摘要: 本文主要讨论移动机器人在自动控制原理课程中的应用。结合测控技术与仪器专业背景, 以移动小车机器人动态系统建模和轨迹跟踪控制器设计为主要任务, 主要介绍动态系统建模、PID 控制器设计等理论应用, 并利用 MATLAB 机器人工具箱进行仿真模拟, 体现测控专业控制类课程紧密结合专业背景的特色。移动机器人小车的应用更能让学生在理论学习中理论联系实际, 学以致用。

关键词: 自动控制; 跟踪控制; PID 控制

引言

《自动控制原理》课程的理论性强、概念抽象, 知识点较多, 学生在理论学习中很难把握住一条主线^[1]。测控技术与仪器专业的学生在专业课的学习中, 很难做到对控制理论和传感器的应用之间的关系有一个深入的理解。通过将移动机器人小车^[2]这样一个集控制与传感器于一身的载体用于自动控制原理课程的教学, 可以很好的拉近理论与实践的距离, 使得学生更容易接受并消化所学的理论知识, 并且可以进一步的进行知识的扩展, 将一些有效的控制器的设计思想应用到其它智能传感器设备的控制中。移动机器人小车是一种典型的自动控制系统, 移动机器人小车的建模、分析与设计是自动控制的具体实现, 可以作为《自动控制原理》教学的应用实例。

本文以移动机器人小车的建模与控制为指引, 主要探讨《自动控制原理》在移动机器人小车系统建模、PID 控制器设计及 MATLAB/Simulink 仿真模拟等方面的课程设计。

*基金资助: 本文系山东交通学院教学改革资助项目 (2018YB31)

一、移动机器人小车动力学建模

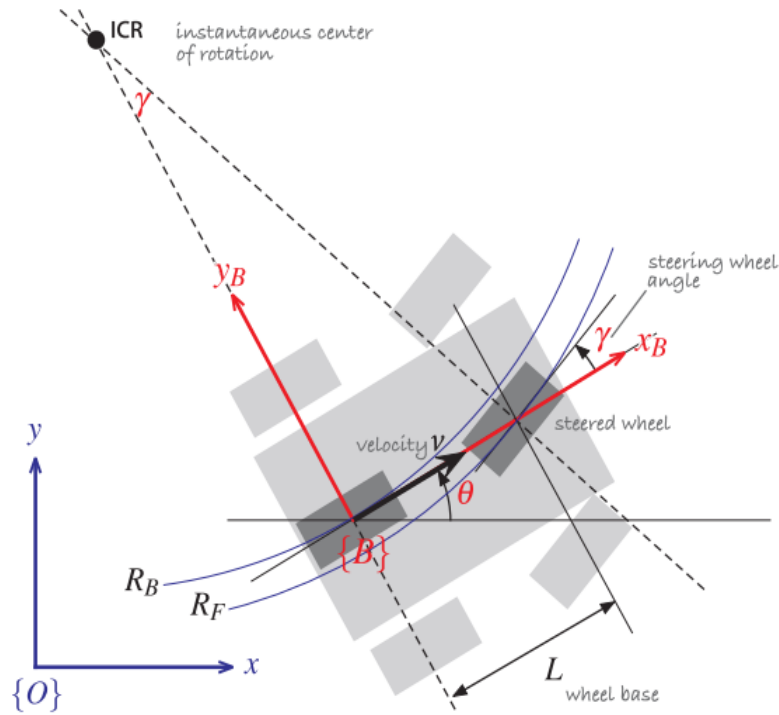


图 1 机器人小车模型^[3]

移动小车的模型是如图 1 所示的双轮车模型，它的后轮固定在车体上，前轮可以绕水平轴转动以完成车辆的转向。

该车的位置和姿态可以用图 1 所示的坐标系 $\{B\}$ 来表示，其中 x 轴为车辆的前进方向，坐标原点设在后轮的中心。该车的位置形态由广义坐标 $q = (x, y, \theta) \in \mathbb{C}$ 表示，其中 $\mathbb{C} \subset SE(2)$ 。

移动机器人小车的运动学模型如下：

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \gamma \end{cases} \quad (1)$$

其中， x, y 分别表示小车在地球坐标系中的前向与横向的位置， v 表示速度， θ 表示小车移动的朝向角， γ 表示转向车轮的转向角度， L 是小车轮基的长度。

二、轨迹跟踪控制器设计及仿真

在这一部分，将对移动机器人小车进行控制器设计，并利用 MATLAB 机器人工具箱^[3]进行仿真模拟，进而验证控制器的有效性。

（一）小车定点跟踪控制

当机器人向平面上的一个目标点 (x_d, y_d) 移动时，定义被控机器人的速度为：

$$v_d = K_v \sqrt{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2} \quad (2)$$

机器人的转向期望角使用地球坐标系中的相对角度：

$$\theta_d = \arctan \frac{y_d - y}{x_d - x} \quad (3)$$

利用比例控制器来调整机器人小车的转向角：

$$\gamma = K_T (\theta_d - \theta), K_T > 0 \quad (4)$$

利用 MATLAB/Simulink 进行模拟仿真，Simulink 模型如图 2 所示：

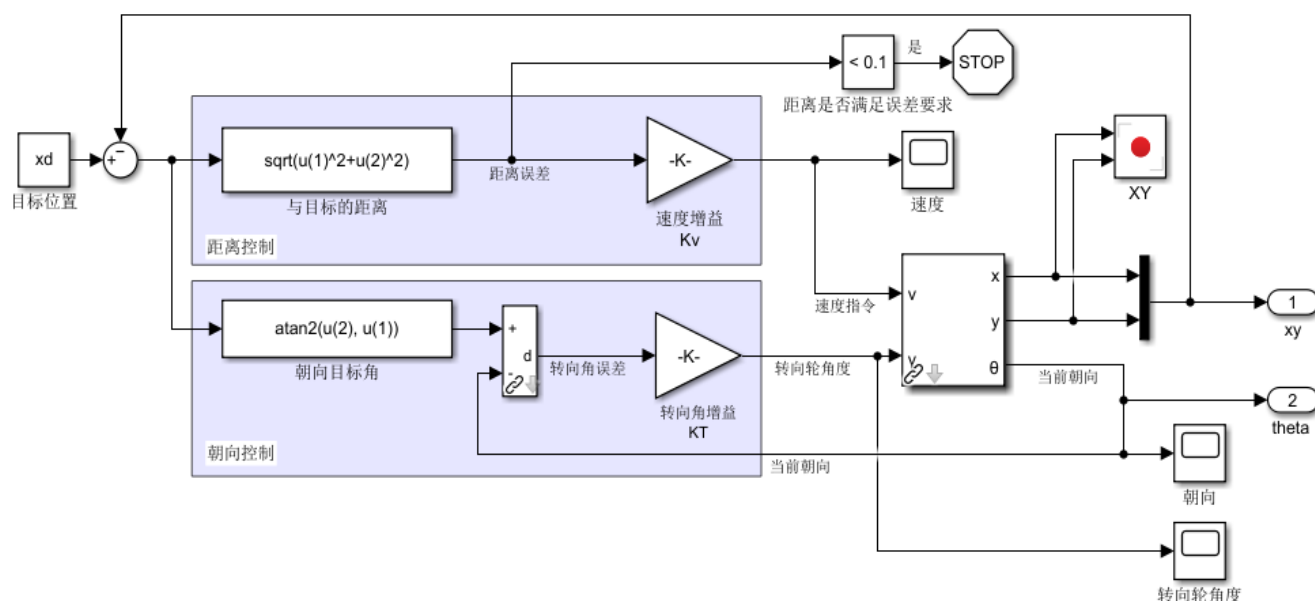


图 2 定点跟踪控制仿真模型

从图 2 中可以看到，整个控制模型是一个闭环反馈控制的模式，移动机器人的当前位置和朝向角度都会传递到系统的输入端，设计比例控制器来对小车的速度和转向进行控制，控制输出与系统的控制目标进行比较，然后判断误差是否为零，进而判定是否达到控制系统设计的要求。

运行图 2 中所示的 Simulink 模型，设定小车的初始位置和目标位置分别为(2,3)和(6,7)，其初始姿态角为 $\frac{\pi}{2}$ ，可以得到小车的移动轨迹曲线如图 3 所示。

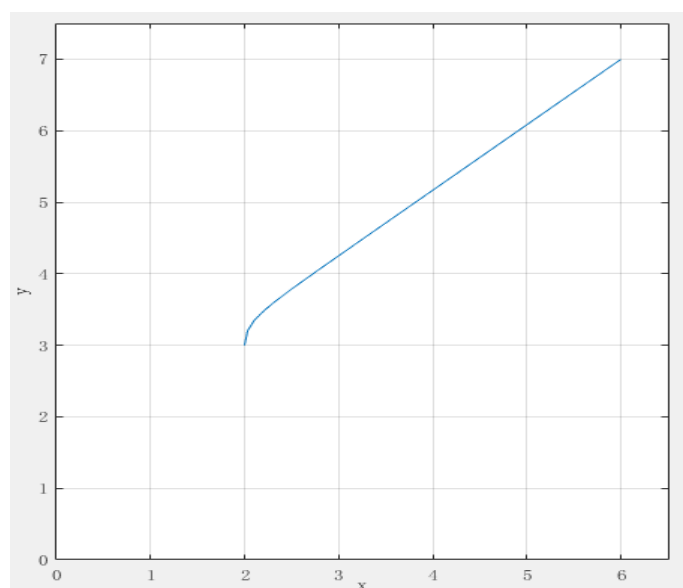


图 3 小车从点(2,3)到点(6,7)的移动轨迹曲线

从图 3 中可以看到，小车的初始朝向角度为 $\frac{\pi}{2}$ ，小车在系统控制器的作用下，迅速调整姿态向目标点移动，最终成功到达目标点。

设定小车的初始位置和目标位置分别为(5,5)和(2,1)，其初始姿态角为 $\frac{\pi}{4}$ ，可以得到小车的移动轨迹曲线如图 4 所示。

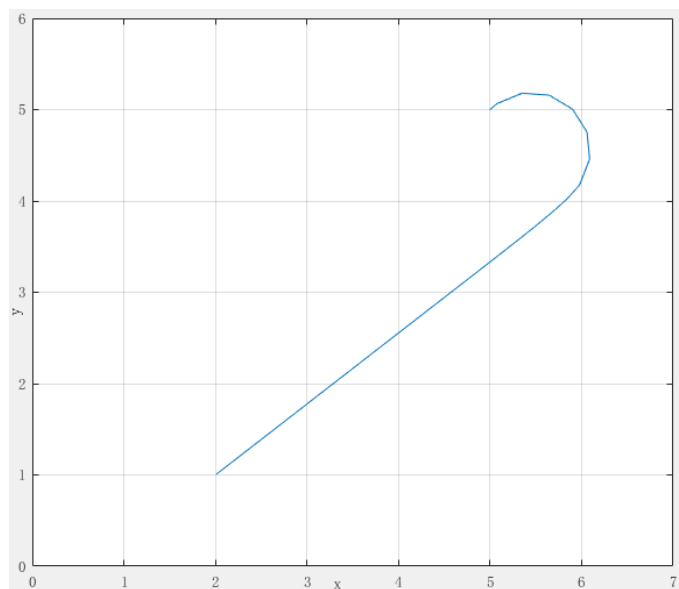


图 4 小车从点(5,5)到点(2,1)的移动轨迹曲线

从图 4 中可以看到，小车的初始朝向角度为 $\frac{\pi}{4}$ ，小车在系统控制器的作用下，迅速调整姿态向目标点移动，最终成功到达目标点。

(二) 直线跟踪控制

当机器人向平面上的一条直线 $ax + by + c = 0$ 移动时，需要设计距离和朝向两个控制器来实现跟踪控制。

(1) 机器人与直线间的垂直距离可表示为：

$$D = \frac{|ax + by + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (5)$$

设计比例控制器：

$$\alpha_D = -K_D D, \quad K_D > 0 \quad (6)$$

它可以控制机器人小车始终朝向目标直线移动。

(2) 设计控制器调整小车移动时的朝向角度，使其始终与目标直线保持平行。此时， $\theta_d = -\arctan \frac{a}{b}$ 。据此设计比例控制器：

$$\alpha_h = K_T (\theta_d - \theta), \quad K_T > 0 \quad (7)$$

(3) 将距离与朝向控制器进行组合，得到：

$$\gamma = -K_D D + K_T (\theta_d - \theta) \quad (8)$$

利用这个控制器，可以使机器人小车不断接近目标直线，并沿着这条直线移动。

利用 MATLAB/Simulink 进行模拟仿真，Simulink 模型如图 3 所示：

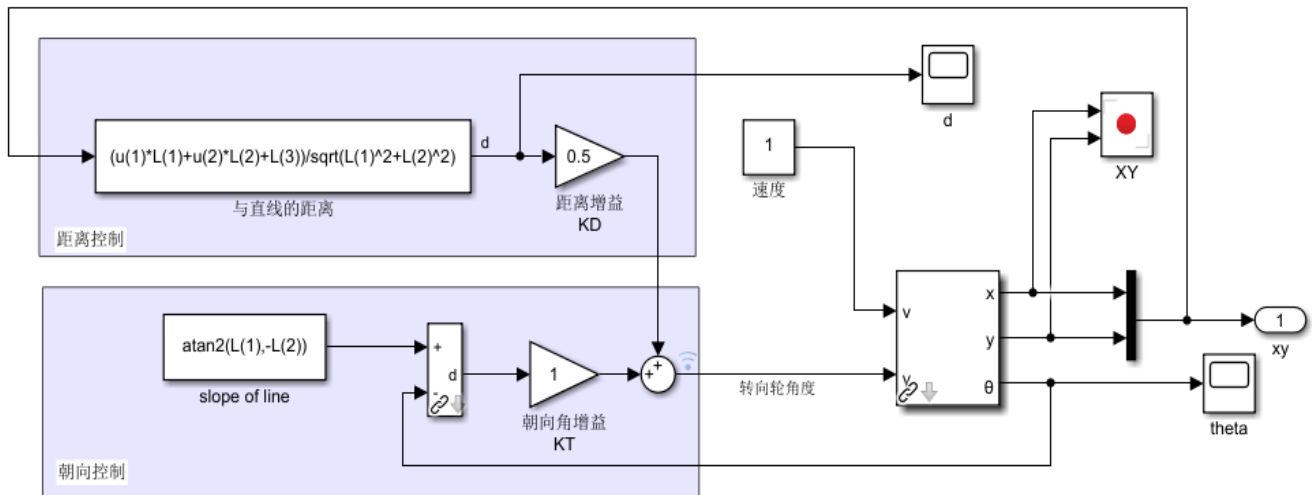


图 5 直线跟踪控制仿真模型

从图 5 中可以看到，整个控制模型是一个闭环反馈控制的模式，系统的输入端由距离控制器和朝向控制器组成，这两个控制器均为比例(P)控制器，在这两个控制器的作用下，小车调整姿态逐渐逼近目标直线，最终沿着这条直线运动。

运行图 5 中所示的 Simulink 模型，设定目标直线为 $x - 3y + 5 = 0$ ，初始位姿为 $\left(6, 7, \frac{\pi}{2}\right)$ ，可以得到小车的移动轨迹曲线如图 6 所示。

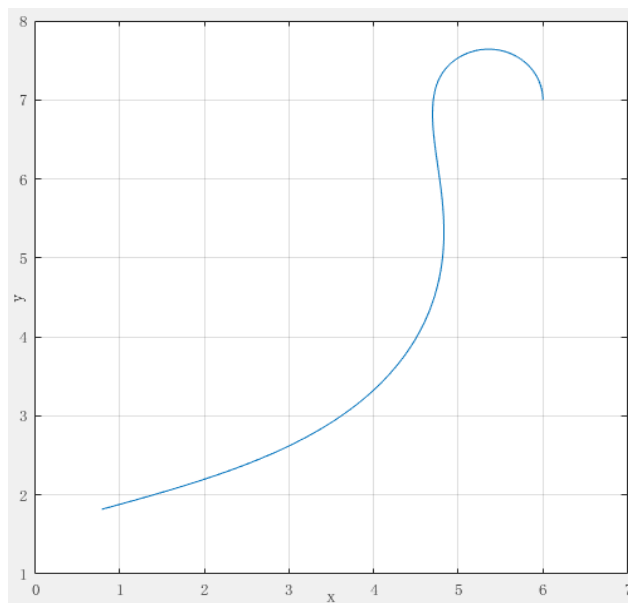


图 6 小车从初始位姿 $\left(6, 7, \frac{\pi}{2}\right)$ 向直线 $x - 3y + 5 = 0$ 移动的轨迹曲线

从图 6 中可以看到，小车的初始朝向角度为 $\frac{\pi}{2}$ ，小车在系统控制器的作用下，迅速调整姿态向目标直线逼近并最终沿着它运动。

设定目标直线为 $x - 3x + 5 = 0$ ，初始位姿为 $\left(1, 2, \frac{\pi}{4}\right)$ ，可以得到小车的移动轨迹曲线如图 7 所示。

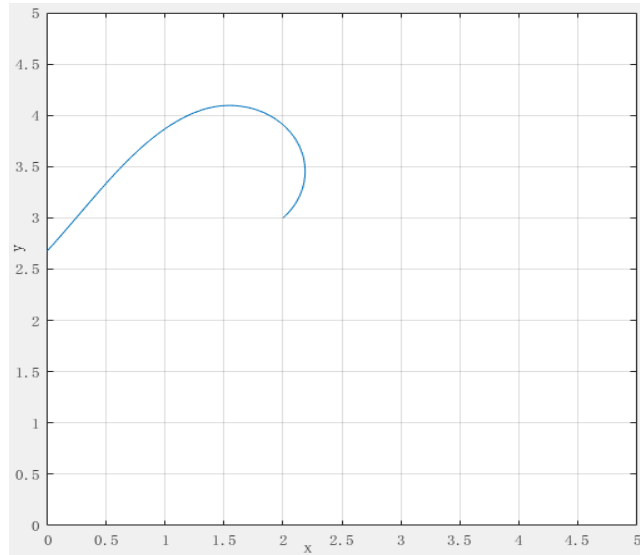


图 7 小车从初始位姿 $\left(2, 3, \frac{\pi}{4}\right)$ 向直线 $x - 3y + 5 = 0$ 移动的轨迹曲线

(三) 一般路径的跟踪控制

除了跟踪直线轨迹以外，机器人小车也能跟踪 xy 平面上的一般曲线所描绘的一条路径。这种路径可能由机器人传感器所捕捉到的实时信息构建而成，也可能由运动规划器所生成。

设小车与所跟踪的动点之间的距离目标值是 d_g ，则跟踪误差定义为：

$$e = \sqrt{(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2} - d_g \quad (9)$$

利用比例积分（PI）控制器设计小车的速度控制器：

$$v_g = K_p e + K_i \int e dt \quad (10)$$

机器人小车的转向期望角使用地球坐标系中的相对角度：

$$\theta_g = \arctan \frac{y_g - y}{x_g - x} \quad (11)$$

利用比例（P）控制器来调整机器人小车的转向角：

$$\gamma = K_h (\theta - \theta_g), K_h > 0 \quad (12)$$

利用 MATLAB/Simulink 进行模拟仿真，Simulink 模型如图 8 所示：

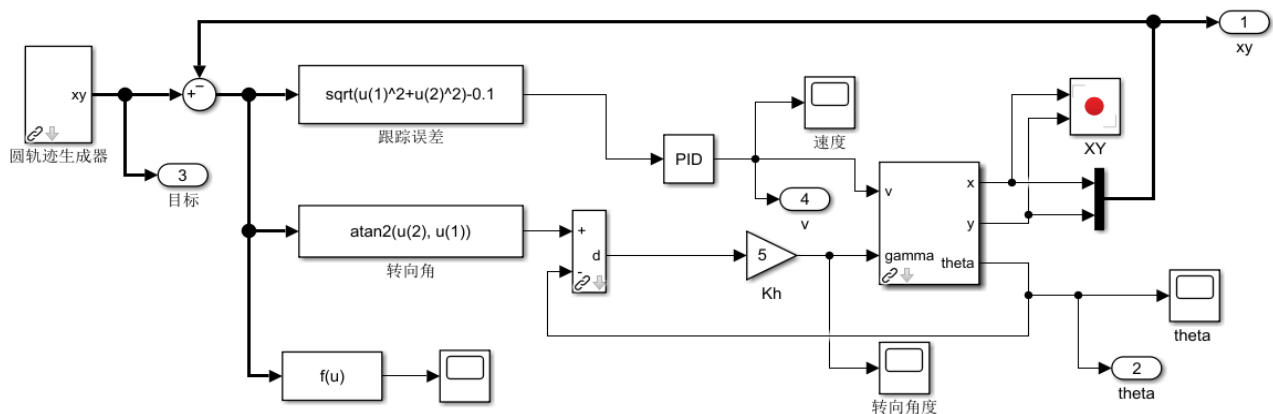


图 8 轨迹跟踪控制仿真模型

从图 8 中可以看到，整个控制模型是一个闭环反馈控制的模式，系统的输入端是一个圆轨迹生成器，小车对圆轨迹上移动的目标点进行跟踪，设计的比例-积分控制器对小车的速度进行控制，使其跟踪误差趋近于零。设计的比例控制器对小车的朝向角度进行控制，控制其转向轮使其朝向目标点。

运行图 8 中所示的 Simulink 模型，机器人小车从原点(0,0)出发，逐渐逼近在单位圆上移动的目标点，直至跟踪上，最终在单位圆上运动。

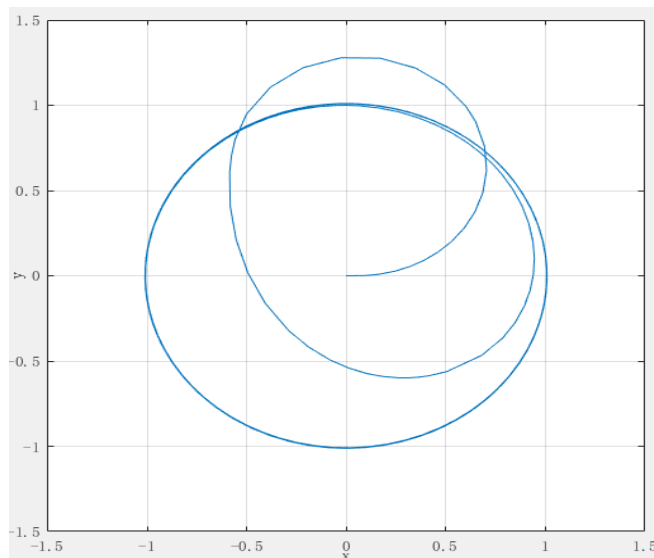


图 9 小车跟踪单位圆的移动轨迹

四、结论

在《自动控制原理》这门课程的教学过程中，引入移动机器人小车进行控制器设计，可以很好的结合测控专业的背景，让控制理论和传感器的应用有了实现的载体，进而提高学生的学习兴趣并让学生学以致用。利用机器人MATLAB工具箱^[2]开展针对性的仿真实验，可以取得较好的教学效果。另外，将移动机器人技术引入自动控制原理教学中，可以较好地提升学生的科技创新能力，助力学生参加各项机器人设计与控制大赛，从而可以实现教学和学生科技活动的贯通，可以达到更好的培养效果。

参考文献

- [1] 卢京潮 主编. 自动控制原理, 清华大学出版社, 2013.
- [2] 宋海涛, 王夏复, 王魁. 机器人在自动控制原理教学中的应用, 2019 (26):165-166.
- [3] Peter Corke. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB, Springer, 2017.