

移动机器人运动轨迹控制系统

朱群峰, 黄磊, 罗庆跃
(邵阳学院 电气工程系, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 以移动机器人的轨迹控制为主要目标, 研究了线性控制算法在机器人轨迹控制中的具体实现方法。论证了其可行性, 分析了算法的稳定性约束条件, 通过仿真分析了控制参数对运动轨迹的影响。将该算法应用到实际的机器人控制中, 设计出了基于陀螺仪和光电编码器的温室移动机器人控制系统。

关键词: 机器人; 轨迹控制; 陀螺仪; 光电编码器
中图分类号: TP211 **文献标识码:** A

Control system of mobile robot movement

ZHU Qun Feng, HUANG Lei, LUO Qing Yue
(School of Electric Engineering, College of Shaoyang, Shaoyang 422000, China)

Abstract: The main target is to study the tracks of mobile robot in greenhouse control in the paper, to research the realization of the linear trajectory control algorithms on robot controlling. We demonstrated its feasibility, the stability of the algorithm constraints. Through the simulation, we analyzed the impact for the trajectory under different control parameters, and applied the algorithm to the actual control of the robot, designed a mobile robot control system based on gyroscopes and photoelectric encoder.

Key words: robot; track control; gyroscope; photoelectric encoder

用机器人技术实现工业作业是多方面的, 机器人的作业是依靠机器人的视觉识别系统和手臂的末端机构来完成主要的作业项目, 首先要解决的问题是机器人的准确定位和可靠动作问题^[1]。

机器人运动的轨迹控制一直是移动机器人的研究核心, 是移动机器人实现高度智能化和完全自主的关键技术。在三维环境下运动, 移动机器人必须通过传感器收集数据, 并通过一定的算法把传感器收集到的数据进行分析、融合, 建立外部环境的数学模型, 正确、全面地反映出外部环境的特征, 为轨迹控制决策提供正确的依据^[2]。移动机器人的运动控制主要依靠传感器的感知、信息的融合、智能控制算法的跟踪及路径规划。

1 移动机器人运动控制基础

机器人轨迹控制的目标是跟踪一条路径, 该路径由它的位置或速度轮廓描述成为时间的函数。机器人

的轨迹控制分为开环控制和闭环控制, 控制精度要求较高时, 更适宜采用闭环反馈控制方法。在闭环控制中, 移动机器人的路径规划工作被简化为所在规划路径的中间点, 按照反馈的参数, 实时调整轨迹。

在机器人自身所在的参考坐标系 $\{X_R, Y_R, \theta\}$ 中, 假设所给定的实际姿态误差向量为

$$e = [x_2, y_2, \theta_2]^T$$

其中, x_2, y_2, θ_2 是机器人的目标姿态参数。轨迹控制器设计的任务就是寻求一个控制矩阵 K :

$$K = \begin{bmatrix} k_{11}, k_{12}, k_{13} \\ k_{21}, k_{22}, k_{23} \end{bmatrix} \quad (1)$$

使得 $v(t)$ 和 $\omega(t)$ 的控制:

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} = K e = K \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

驱动误差 e 趋于零: $\lim_{x \rightarrow \infty} e(t) = 0$ (3)

为不失一般性，假定目标位置处于在惯性框架的原点，如图 1 所示。

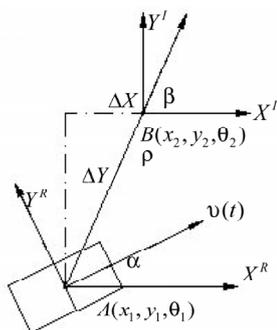


图 1 机器人运动模型

在参考坐标系 $\{X_I, Y_I, \theta\}$ 中，机器人的运动学描述如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 \dot{x} 和 \dot{y} 是在参考系 X_I 和 Y_I 方向中的直线速度，令 α 表示机器人参考框架 X_R 和机器人运动中心与最终位置的向量 \hat{x} 之间的角度，如果 $\alpha \in I_1$,

$$I_1 = (-\pi/2, \pi/2] \quad (5)$$

将坐标转换到原点在目标位置的极坐标：

$$\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}; \quad \beta = -\theta - \alpha \quad (6)$$

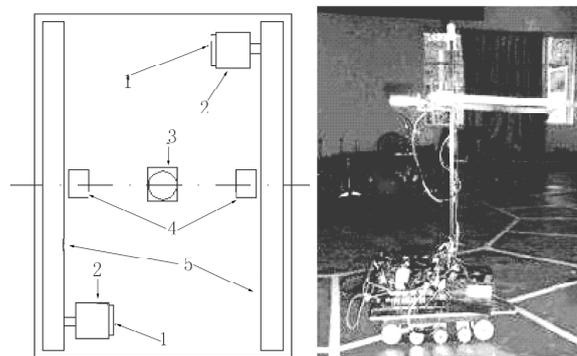
由此，在新的极坐标中，得到系统的描述：

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\alpha & 0 \\ \frac{\sin\alpha}{\rho} & -1 \\ -\frac{\sin\alpha}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中， ρ 表示机器人中心与目标位置之间的距离， θ 是机器人参考框架 X_R 和最终位置相关的 X_I 之间的角度， v 和 ω 分别表示切向速度和角速度。

2 移动机器人控制系统设计^[3]

本系统中，采用陀螺仪和光电编码器实现机器人的轨迹导航。移动机器人前进、旋转时，不可避免地会和地面发生滑动摩擦，使得系统的输出控制量不能准确反映到控制系统中。陀螺仪实现角速度信号的测量，电编码器实现线速度信号的测量。而采用陀螺仪的导航系统，要求实时累积的机器人位置要足够准确。因此，在底盘添加左右 2 个从动轮及光电编码器，从动轮的运动量可以真实反映机器人的运动路程。由此可以通过左右 2 个从动轮的即时速度计算出机器人的等效线速度和角速度。为了保证从动轮与地面紧密接触，考虑在从动轮上加置弹簧圈，机器人的底盘驱动和外观示意图如图 2 所示。



1- 驱动电机编码器 2- 驱动电机 3- 陀螺仪 4- 从动轮 5- 履带

图 2 移动机器人底盘驱动和外观示意图

机器人的系统硬件部分由 ARM7 微处理器 LPC2138、测角陀螺仪、光电编码器、直流电机以及电机驱动电路组成。陀螺仪选用 GQ-3 单轴陀螺仪，该陀螺是基于机械陀螺芯片封装的测角陀螺模组，提供串口数据输出的瞬时角度值，波特率 9 600b/s，8 位数据位，1 位停止位，无校验。如表 1 所示。

表 1 GQ-1 单轴陀螺数据帧格式

字节位	字节内容	说明
1	FF(或 FE)	角度数据起始字节，FF 表示数据符号为正，FE 表示为负
2	X1	数据高位
3	X2	数据低位
4	FD(或 FC)	厂家内测数据起始字节，FD 表示为正，FC 表示为负
5	Y1	厂家内测数据高位
6	Y2	厂家内测数据低位
7	CHK	1-6 字节的累加和校验

3 机器人控制系统控制算法^[4]

机器人的线速度 v 和角速度 ω 是轨迹导航的控制信号，控制算法需要设计对于 v 和 ω 的控制规律，把机器人从当前实际位置驱动到目标位置。

在移动机器人轨迹控制系统中，采用线性控制算法：

$$v = k_p \rho; \quad \omega = k_\alpha \alpha + k_\beta \beta \quad (8)$$

由式(7)可以得出

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_p \rho \cos\alpha \\ k_p \sin\alpha - k_\alpha \alpha - k_\beta \beta \\ -k_p \sin\alpha \end{bmatrix} \quad (9)$$

控制系统在 $\rho=0$ 时没有奇异，在 $(\rho, \alpha, \beta)=(0,0,0)$ 有唯一的平衡点，所以它可以驱动机器人运动到目标点。由式(8)知，机器人角速度 v 的符号是恒定的，只要 $\alpha(0) \in I_1$ ， v 就一直为正向；反之，则一直反方向运动，即机器人从启动到停止总是在单方向、无逆向运动。

在实际应用中, k_ρ 、 k_α 、 k_β 的参数组合需要满足控制系统的局部稳定性条件。将式(9)线性化, 得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_\rho & 0 & 0 \\ 0 & -(k_\alpha - k_\beta) & -k_\beta \\ 0 & -k_\rho & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

要使得它是局部指数地稳定, 则矩阵特征值

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -k_\rho & 0 & 0 \\ 0 & -(k_\alpha - k_\beta) & -k_\beta \\ 0 & -k_\rho & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

应全部有负实部。即矩阵 \mathbf{A} 的特征多项式:

$$(\lambda + k_\rho)(\lambda^2 + \lambda(k_\alpha + k_\beta) - k_\rho k_\beta) \quad (12)$$

所有的根有负的实部, 因此 k_ρ 、 k_α 、 k_β 3个参数应满足:

$$k_\rho > 0; k_\beta < 0; k_\alpha - k_\rho > 0 \quad (13)$$

4 算法仿真

为了进一步分析 k_ρ 、 k_α 、 k_β 参数对运动轨迹的影响, 在 Simulink 中建立仿真模型, 由控制信号 $\omega(t)$ 和 $v(t)$ 驱动系统从初始点 $(0, 0, 90^\circ)$ 运动到目标位置 $(40, 30, 0^\circ)$ 。

Simulink 仿真的结果如图 3 所示, 可知在不同的 k_ρ 、 k_α 、 k_β 参数控制下, 系统的表现结果大不相同, 但是所有的曲线均是一系列平滑的轨迹。基于本控制算法的控制系统必须满足式(13)的稳定条件, 机器人才能稳定地到达目标位置, 即满足 $k_\rho > 0$ 、 $k_\beta < 0$ 、 $k_\alpha > k_\rho$ 。对比上述

4 条仿真曲线, 可得结论如下:

(1)图 3(d), 不遵循稳定条件, 仿真曲线无法稳定地停止在目标点。而图 3(c), $k_\alpha = k_\rho$, 处于临界情况下, 则曲线可以停止于目标点。因此, 在具体实现算法的时候, 必须满足稳定条件;

(2) 对比图 3(a)和图 3(c), 可知 k_ρ 越小, 即机器人线速度越小, 曲线的表现形式越好, 运动路线越短, 但是在实际运动中, 速度太慢会显著增加运动时间^[5]。所以, 在实际应用中, 在硬件条件允许的前提下, 在机器人运动的中间过程中可以适当增加 k_ρ , 以缩短运动时间, 而在运动过程的最后阶段一定要降低运动速度, 提高运动的稳定性;

(3)对比图 3(a)和图 3(b), 可以发现绝对值较大的 k_β , 也会降低系统的性能, 因为改变 k_β 的大小不会影响机器人的线速度, 因此在应用中可以适当选择绝对值较小的 k_β 值。

在温室移动机器人的实际控制中, 由于软硬件等各方面的限制, k_ρ 、 k_α 、 k_β 参数的选取可以与理想的情况有所差别, 应该根据实际情况, 通过试验选择合适的参数, 尤其是 k_ρ 的选择直接与电机的驱动能力和机器人运动速度有关。在开始阶段应逐步增加 k_ρ 的值, 使机器人逐渐加速运动起来, 在运动中间过程中可以取较大的 k_ρ , 而在接近目标点时需要将 k_ρ 值再降低, 提高机器人到达目标点的准确性。该控制策略可靠性较高, 在灵活的机构和可靠的硬件配合下, 能够满足移动机器人的准确快速定位和路径导航的要求。

参考文献

- [1] 梁坤.一种实用机器人定位系统的研究、实现与改进,电子机械工程,2006,22(4):61-64.
- [2] 张毅,罗元,郑太雄.移动机器人技术及其应用[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [3] 陈志国,须文波,刘炜.基于运动控制卡的机器人智能切割系统[J].微计算机信息,2005,21(28X):95-97.
- [4] 徐华,付立思,孙晓杰,等.基于ARM的农用机器人开放式控制器的设计[J].农机化研究.2007(5):124-126.
- [5] 刘艳菊,戴学生,刘树东.机械手运动轨最优模糊控制系统框架[J].计算机工程与应用,2007,43(4):224-226.

(收稿日期 2008-12-24)

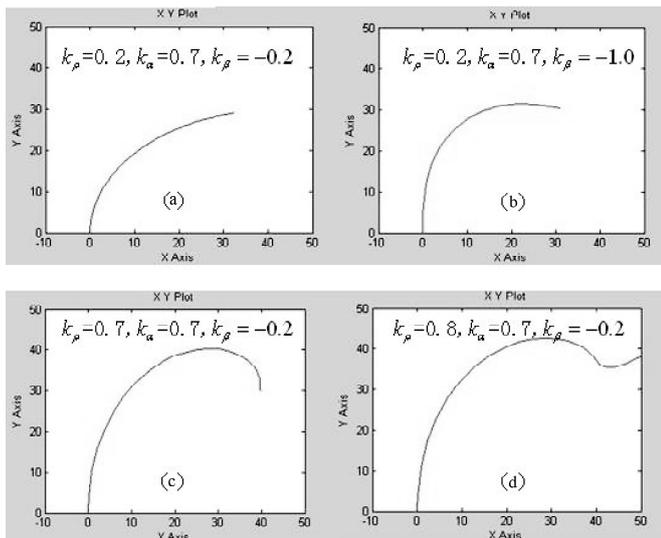


图 3 仿真曲线示意图