

全向轮机器人路径规划与导航系统设计

李文学¹, 饶运清¹, 戚得众², 易王画¹

(1. 华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 湖北工业大学 湖北省农业机械工程研究设计院, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 全向轮机器人因不存在非完整性约束可向任意方向做直线运动而不需事先做旋转运动, 可执行复杂的弧线运动。介绍了一种基于正交码盘与陀螺仪建立的全向轮底盘定位系统与基于 Bezier 曲线路径规划的机器人导航算法。以 13 年亚太机器人大赛国内选拔赛参赛机器人为平台, 通过研究三轮全向轮底盘的运动特性, 以 DSP+FPGA 为控制核心, 结合外部传感器实现了对机器人的运动控制, 使其能够跟随基于 Bezier 曲线规划的路径运动。实验表明, 该套控制系统具有良好的运动控制精度, 并在比赛应用中满足了高速、精确的底盘运动控制要求。

关键词: 全向轮机器人; 全场定位; Bezier 曲线路径规划; 速度规划; 导航

中图分类号: TH16; TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3997(2014)12-0018-05

Design of Path Planning and Navigation for Omnidirectional Wheel Robot

LI Wen-xue¹, RAO Yun-qing¹, QI De-zhong², YI Wang-hua¹

(1. The State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Wuhan 430074, China; 2. Hubei Agricultural Machinery Engineering Research and Design Institute, Hubei University of Technology, Hubei Wuhan 430068, China)

Abstract: The omnidirectional wheel robot doesn't have non-integrity constraints so that it can move towards any direction without rotating itself beforehand, and executes complicated paths easily. To achieve the flexible control of wheeled robot, a positioning system consisting of two orthogonal encoders and a gyro along with a navigation algorithm based on tracking planned Bezier curves path is introduced. Based on the platform of robot for ABU Robocon competition, through the research of the motion characteristics of three omnidirectional wheels, DSP and FPGA was used as the controller combined with other sensors to control the robot to track the planned paths based on Bezier curves. The experiments show that this system has good motion and accuracy characteristics and meets the control characteristics requirements in competition.

Key Words: Omnidirectional Wheel Robot; Positioning; Bezier Curves Path Planning; Speed Planning; Navigation

1 引言

轮式移动机器人作为机器人学中的一个重要分支, 在国民经济的各个领域得到了广泛应用。其中全方位移动机构因不存在非完整性约束, 可向任意方向做直线运动而不需事先做旋转运动, 在执行直线运动的同时能执行旋转运动, 具有运动灵活、自由控制的优点。目前全方位移动机器人已在会展、家庭服务类机器人以及 RoboCup、ABU Robocon 等赛事中得到广泛应用。实际应用中, 全方位移动机构的全场定位和导航算法是机器人控制性能的重要保障, 全向轮底盘机器人参加了 2013 年亚太大学生机器人大赛国内选拔赛, 比赛任务要求全向轮底盘能够灵活运动并具有较高的运动控制精度。基于以上要求介绍了一种基于正交码盘与陀螺仪的定位系统与基于 Bezier 曲线的路径规划导航算法, 满足了比赛的运动控制需求。

2 全向轮底盘机构设计

全方位移动机器人具有全方位运动能力的关键在于全方位轮系结构, 其具有的大轮边缘套有小轮的机构能够避免普通轮系不能侧滑带来的非完整性运动限制从而实现全方位运动。研究的全方位机器人底盘以 3 个全向轮^[1]组成。实际使用中考虑到增加轮子的负载能力并使每个轮子更接近整圆而采用了两个全向轮并排使用。机器人底盘三维模型, 如图 1 所示。三个全向轮运动轴心夹角按照 120°进行设计。根据机器人运行工况假设底盘是刚体, 底盘三个全向轮由独立的电机驱动。底盘运动信息主要通过两个编码器和一个陀螺仪获取。为适应底盘全方位移动的特点, 编码器尾部连接一个小型全向轮, 并将两个编码器的运动轴心成 90°夹角布置。陀螺仪水平固定在底盘上(模型中未画出), 检测机器人的角度信息。

来稿日期: 2014-05-24

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2011ZX04015-011-07)

作者简介: 李文学, (1992-), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 制造执行系统、机电一体化;

饶运清, (1968-), 男, 湖北赤壁人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 现代集成制造、制造执行系统等

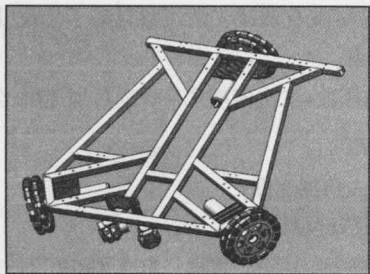


图 1 全向轮底盘三维模型

Fig.1 Omni-Directional Wheel Chassis 3D Model

3 全向轮底盘的定位模型与运动模型

目前全向轮底盘定位方式包括传感器定位,单码盘加陀螺仪定位等。传感器实时定位精度较低,无法满足定位要求;单码盘加陀螺仪定位精度较高,但理论上要求码盘安装在机器人的运动中心,机械安装误差对定位效果影响很大。使用的定位方式为正交码盘加陀螺仪定位,具有定位精度高、安装方便、支持全向行走的特点。下面建立基于正交码盘与陀螺仪的三轮全向轮底盘定位模型与运动模型。

3.1 定位模型

建立场地全局坐标系 X_a-Y_a 和机器人自身坐标系 X_r-Y_r ,如图 2 所示。 X_r-Y_r 坐标系原点为机器人三个全向轮运动轴心交线处, α 为 X_a 与编码器 1 运动轴心的夹角, θ 为 X_a 与 X_r 的夹角, L_1 、 L_2 、 L_3 为 X_r-Y_r 坐标系原点到三个全向轮中分面的垂直距离, l_1 、 l_2 为机器人坐标系原点到两个编码器连接的小型全向轮中分面的垂直距离, V_1 为码盘沿码盘连接的小型全向轮驱动方向的速度, $V_{\text{轮}1}$ 、 $V_{\text{轮}2}$ 、 $V_{\text{轮}3}$ 分别代表三个电机驱动的底盘全向轮速度。

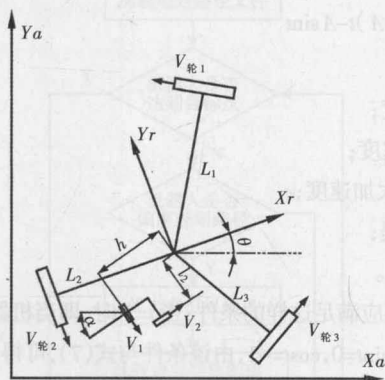


图 2 全局坐标系与机器人坐标系

Fig.2 The Global Coordinate System and Robot Coordinate System

系统运动学方程如下:

$$V_1 = \dot{x}_a \sin \alpha - \dot{y}_a \cos \alpha + l_1 \dot{\alpha}$$

$$V_2 = \dot{x}_a \cos \alpha + \dot{y}_a \sin \alpha + l_2 \dot{\alpha}$$

由几何关系知, $\alpha = \theta + 15^\circ$ 。

规定 θ 为机器人的位姿,可由陀螺仪计算得到。将上式写为矩阵形式,得到机器人运动学模型:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta+15^\circ) & -\cos(\theta+15^\circ) & l_1 \\ \cos(\theta+15^\circ) & \sin(\theta+15^\circ) & l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

两边乘以 dt , 得到:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta+15^\circ) & -\cos(\theta+15^\circ) & l_1 \\ \cos(\theta+15^\circ) & \sin(\theta+15^\circ) & l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix}$$

其中:

$$S_1 = V_1 \cdot dt, S_2 = V_2 \cdot dt$$

$$dx = \dot{x}_a \cdot dt, dy = \dot{y}_a \cdot dt, d\theta = \dot{\theta}_a \cdot dt$$

反解该矩阵,得到:

$$dx = S_1 \sin(\theta+15^\circ) + S_2 \cos(\theta+15^\circ) -$$

$$l_1 \sin(\theta+15^\circ) d\theta - l_2 \cos(\theta+15^\circ) d\theta$$

$$dy = S_2 \sin(\theta+15^\circ) - S_1 \cos(\theta+15^\circ) +$$

$$l_1 \cos(\theta+15^\circ) d\theta - l_2 \sin(\theta+15^\circ) d\theta$$

$d\theta$ 可由陀螺仪数据计算得到, S_1 、 S_2 可由编码器数据计算得到,由此可以计算得到底盘中心在一个系统采样周期 dt 内的位移。

系统运行后不断进行采样并对所有采样周期的位移增量与角度增量累加,即:

$$x = x + dx, y = y + dy, \theta = \theta + d\theta$$

由此得到每一时刻底盘运动中心的坐标与位姿,完成场地全局坐标系下的底盘定位。

3.2 运动模型

根据底盘三个全向轮与底盘运动中心的几何关系,得到电机驱动全向轮运动学方程如下:

$$V_{\text{轮}1} = \dot{x}_a \sin \theta - \dot{y}_a \cos \theta + L_1 \dot{\theta}$$

$$V_{\text{轮}2} = \dot{x}_a \sin(60^\circ - \theta) + \dot{y}_a \cos(60^\circ - \theta) + L_2 \dot{\theta}$$

$$V_{\text{轮}3} = -\dot{x}_a \sin(60^\circ + \theta) + \dot{y}_a \cos(60^\circ + \theta) + L_3 \dot{\theta}$$

将上式写为矩阵形式,得到机器人的运动模型:

$$\begin{bmatrix} V_{\text{轮}1} \\ V_{\text{轮}2} \\ V_{\text{轮}3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & L_1 \\ \sin(60^\circ - \theta) & \cos(60^\circ - \theta) & L_2 \\ -\sin(60^\circ + \theta) & \cos(60^\circ + \theta) & L_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta}_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

令:

$$P = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & L_1 \\ \sin(60^\circ - \theta) & \cos(60^\circ - \theta) & L_2 \\ -\sin(60^\circ + \theta) & \cos(60^\circ + \theta) & L_3 \end{bmatrix}$$

$$V = [V_{\text{轮}1} \quad V_{\text{轮}2} \quad V_{\text{轮}3}]^T$$

$$S = [\dot{x}_a \quad \dot{y}_a \quad \dot{\theta}_a]^T$$

式(1)可简写为: $V = PS$ 。

式中: V —全向轮底盘电机速度矢量;

P —变换矩阵;

S —全向轮底盘期望速度矢量。

由此完成机器人定位模型与运动模型的建立。

4 基于 Bezier 曲线的路径规划与导航算法

路径规划与速度规划是机器人具备行走能力的基础,对轮式机器人更是如此。机器人理想的运动路径应是一条光滑连续的曲线,并且运动速度应对时间可导,由此实现平稳运动。三阶

Bezier 曲线具有光滑、连续等数学性质,是比较合适的路径规划^[9]方法,并已在 RoboCup 中得到广泛应用。

但国内有关的研究大多着重于机器人的实时路径规划,较少涉及到速度规划。良好地速度规划可以减小底盘因加速度不恰当引起的冲击,利于机器人平稳运动。考虑到 ABU Robocon 中机器人跑动的路径相对固定,本课题采用三阶 Bezier 曲线规划机器人路径,之后通过插补法完成机器人位姿、速度规划,使用 Visual Studio 编写程序在电脑端生成包含底盘路径、速度信息的.h 文件并烧录到机器人主控芯片中。机器人在运动过程中实时读取该文件并通过导航算法完成路径跟踪与导航控制。

4.1 Bezier 曲线

Bezier 曲线可根据给定空间 $n+1$ 个点的位置矢量 $P_i(i=0,1,2,\dots,n)$ 来确定:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i \text{Bin}(t), t \in [0,1]$$

式中: P_i —构成 Bezier 曲线的特征多边形; $\text{Bin}(t)$ — n 次 Bezier 曲线的基函数:

$$\text{Bin}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i}, (i=0,1,\dots,n)$$

特别的, $0^0=1, 0! = 1$ 。

根据给定的两点坐标与矢量方向,三阶 Bezier 曲线应满足如下约束条件:

$$\begin{cases} f(x(t_0)) = y(t_0) \\ df(x(t_0))/dx = \tan(\theta(t_0)) \\ f(x(t_f)) = y(t_f) \\ df(x(t_f))/dx = \tan(\theta(t_f)) \end{cases}$$

式中: $(x(t_0), y(t_0))$ 与 $(x(t_f), y(t_f))$ —两点坐标。

4.2 基于 Bezier 曲线的路径规划

已知机器人起始点坐标位姿 $P_s(X_s, Y_s, \theta_s)$, 初速度 V_s 和终止点坐标位姿 $P_g(X_g, Y_g, \theta_g)$ 及其速度 V_g , 连接 P_s 和 P_g 这两点的三阶 Bezier 曲线方程可用下式表示。

$$\begin{cases} x = x_s(1-u)^3 + 3x_2(1-u)^2u + 3x_3(1-u)u^2 + x_gu^3 \\ y = y_s(1-u)^3 + 3y_2(1-u)^2u + 3y_3(1-u)u^2 + y_gu^3 \end{cases}$$

其中,

$$\begin{cases} x_2 = x_s + \lambda_1 v_s \cos \theta_s \\ y_2 = y_s + \lambda_1 v_s \sin \theta_s \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_3 = x_g + \lambda_2 v_g \cos \theta_g \\ y_3 = y_g + \lambda_2 v_g \sin \theta_g \end{cases} \quad (3)$$

式中: λ_1, λ_2 —正数, λ_1, λ_2 的大小分别表明了机器人受起始点位姿与速度和目标点位姿与速度的影响程度。只要能满足机器人的机械要求, λ_1 一般取值较小, λ_2 取值较大, 以便尽快调整角度完成机器人的动作, $u \in [0,1]$ 。

4.3 机器人位姿规划

全向轮底盘的位姿方向与速度方向不同, 需要增加位姿规划这部分工作。它要求在给定起点位姿 θ_1 和角速度 w_1 , 终点位姿 θ_2 和角速度 w_2 和运动时间 t 的情况下, 设计出全向轮底盘的位姿

变化规律, 使位姿变化曲线光滑可导且易于修改, 同时满足角加速度连续的约束。

采用三角函数+二次多项式来规划角加速度, 公式如下:

$$\beta = A \sin t + Bt^2 + Ct \quad (4)$$

式中: β —机器人角加速度;

A, B, C —待定参数。

对式(4)进行两次积分, 可得到角速度和角度的表达式, 如下:

$$w = -A \cos t + \frac{1}{3} Bt^3 + \frac{1}{2} Ct^2 + E \quad (5)$$

$$\theta = -A \sin t + \frac{1}{12} Bt^4 + \frac{1}{6} Ct^3 + Et + F \quad (6)$$

式中: w, θ —机器人的角速度和位姿;

E, F —待定参数。

在已知 $\theta_1, w_1, \theta_2, w_2$ 和 t 的情况下, 就能反解出 A, B, C, E, F , 再代入式(6)中, 就能得到任意时刻全向轮底盘的位姿。

4.4 机器人线速度规划

与机器人路径形状二次可导一样, 机器人在路径上运行的位置变化也应是二次可导的, 即加速度连续, 这样才能保证机器人运行平稳。

现假设两控制点的目标速度分别为 v_1, v_2 , 机器人由第一个控制点向第二个控制点运动时, 其速度应由 v_1 变化至 v_2 , 其加速度为与路程相关的正弦曲线, 由此可列出式(7)。

$$\begin{cases} a = A \sin t \\ v_2 - v_1 = 2A \\ v = -A \cos t + v_1 + A \\ S = (v_1 + A)t - A \sin t \\ S = vt \end{cases} \quad (7)$$

式中: v —速度;

a —加速度;

A —最大加速度;

S —路程;

t —时间。

同时, 还应满足这样的条件: 当 $t=T$ 时, 即当机器人运动至第二控制点时, $\sin t=0, \cos t=-1$, 由该条件与式(7), 可得:

$$\begin{cases} a = 0.5(v_2 - v_1) \sin(\pi t(v_1 + v_2)/(2S)) \\ v = v_1 + 0.5(v_2 - v_1)(1 - \cos(\pi t(v_1 + v_2)/(2S))) \end{cases}$$

即得到机器人线速度规划的方程。

根据上述思路利用 Visual Studio 编写路径规划程序, 完成机器人路径与速度的规划。其规划得到的路径、速度信息曲线见实验及结论部分。

4.5 导航控制

导航控制^[10]是移动机器人的一项关键控制技术, 它能使机器人在运动过程中迅速识别是否偏离正确路径, 并在偏离时有效纠偏, 使机器人较高精度地跟随预先规划的路径运动。根据实际比赛运动精度的要求, 提出了一种基于 PID 补偿的指向目标点法实现机器人的导航控制, 如图 3 所示。

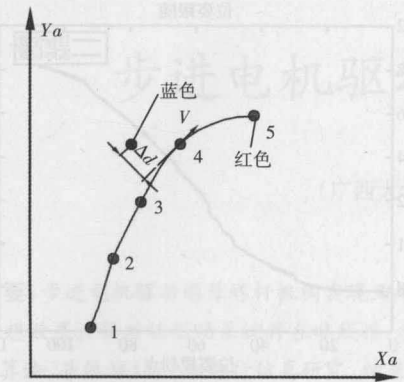


图 3 指向目标点导航
Fig.3 Point Target Navigation

为了便于理解该方法,结合图 3 建立如下概念:

虚拟目标点:在机器人运动方向上处于机器人当前位置(图 3 中蓝色点)点前方的规划点(图 3 中红色点)。

导航距离偏差:机器人当前位置据虚拟目标点沿垂直虚拟目标点速度方向的距离(Δd)。导航位姿偏差:机器人当前位姿相对于虚拟目标点位姿的偏差。

指向目标点法的思路如下:机器人的实际运动路径偏离规划路径时,机器人选取得到虚拟目标点(图中将选取点 4)并计算得到导航距离偏差 Δd 与导航位姿偏差 $\Delta\theta$, 将 Δd 与 $\Delta\theta$ 输入到 PID 反馈器^[9]中得到补偿平动速度与补偿转动速度,与虚拟目标点的规划速度合成之后得到机器人之后实际执行的目标速度。

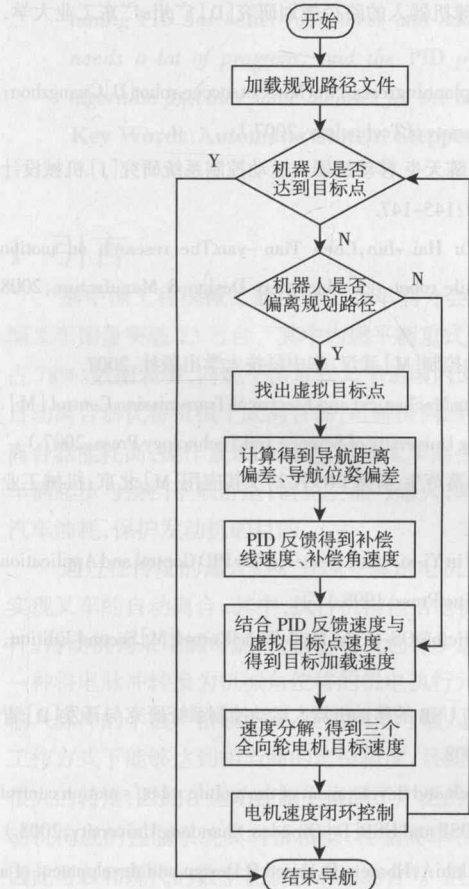


图 4 导航算法流程图
Fig.4 Navigation Algorithm Flow Chart

之后利用式(1)分解得到三个电机驱动全向轮的目标速度,使用 PID 算法进行三个电机的速度闭环控制^[9],完成机器人的导航控制,导航算法流程图,如图 4 所示。

5 机器人控制系统设计

机器人控制系统主要完成如下任务:完成底盘的全场定位、获取机器人的实时运动速度、执行导航控制得到目标速度、将目标速度实时分解为三个电机驱动全向轮的目标速度、完成每个电机驱动全向轮的速度闭环控制。从而实现机器人从任意坐标位姿(x_1, y_1, θ_1)跟踪 Bezier 曲线路径到达另一坐标位姿(x_2, y_2, θ_2)。

5.1 系统硬件结构设计

控制系统硬件组成,如图 5 所示。由核心控制模块、传感器检测模块、电机驱动模块等部分组成。其中核心控制模块采用某公司的 TMS320F2812 型号 DSP 与某公司的 EP4CE10E22C8N 型号 FPGA 为控制核心,主要完成各外设的底层驱动、机器人的定位、导航、电机的闭环控制等;传感器检测模块包括陀螺仪、编码器,陀螺仪采用奥托尼克斯 ADIS16130,编码器采用欧姆龙 E30S 系列;FPGA 产生的高精度 PWM 通过 LMD18200 全桥功率驱动模块控制电机。

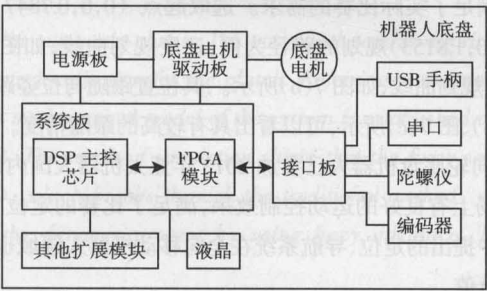


图 5 控制系统硬件组成
Fig.5 Control System Hardware

5.2 系统软件结构设计

机器人程序控制系统采用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统^[7],系统是一个基于任务优先级的可移植、可固化、占先式多任务实时操作系统。各控制程序采用模块化设计方法,主要包括陀螺仪数据处理任务、机器人定位计算任务、机器人运动导航任务、电机速度闭环控制任务^[8]。程序框架,如图 6 所示。

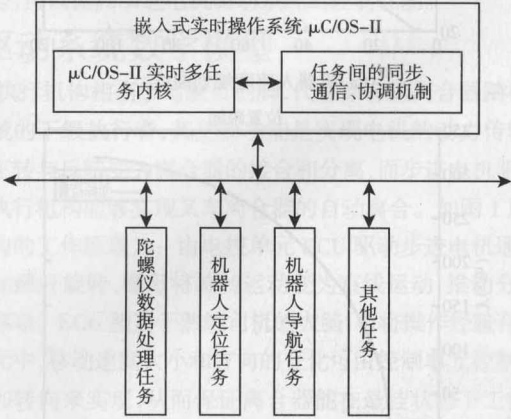


图 6 控制系统程序框架
Fig.6 Control System Program Frame

陀螺仪数据处理任务的优先级最高,该任务每隔 1ms 采集

1次陀螺仪输出的角速度数据并进行处理,得到角度值。机器人定位计算任务主要实现机器人实时定位,通过对得到的陀螺仪、编码器数据进行计算得到底盘实时的坐标、位姿、速度等信息。

导航任务主要完成机器人的导航控制,根据机器人当前位置坐标得到目标点坐标信息与补偿速度,综合计算得到底盘运动目标速度并分解为三个电机驱动全向轮的目标速度,之后采用PID算法实现电机的闭环控制。

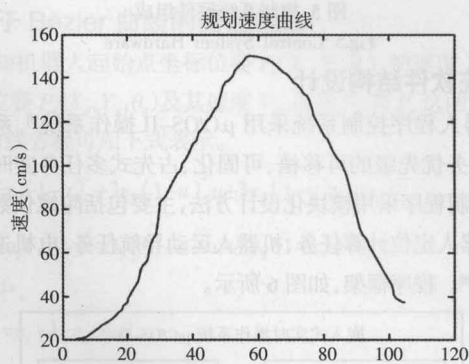
其他任务包括串口收发数据、液晶显示任务等,主要建立友好的人机交互界面,方便机器人调试。

6 实验及结论

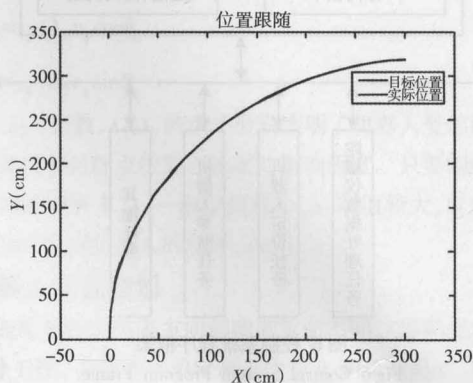
机器人底盘驱动轮半径为76mm,三个全向轮中分面距离机器人坐标系中心的距离分别是428.4mm、327.6mm、327.6mm,底盘总重8.5kg,在长7m、宽7m的区域内沿直线或者曲线运动。

全向轮底盘执行电脑端路径规划程序生成的包含直线、曲线且具有不同规划速度的不同路径,主控DSP在底盘运动过程中通过无线串口返回目标点与当前点数据。经过至少50次的运行测试,通过Matlab对电脑端串口接收的数据绘制曲线分析,机器人的路径跟随误差在2.0cm以内,位姿跟随误差在0.04rad以内,满足了实际比赛的需求。选取起点(0,0,0.7847)、终点(300,320,1.8153)规划的路径为例,速度规划曲线,如图7(a)所示。路径规划曲线,如图7(b)所示,其位置跟随与位姿跟随效果如图7(b)、图7(c)所示,可以看出具有较高的跟随精度。

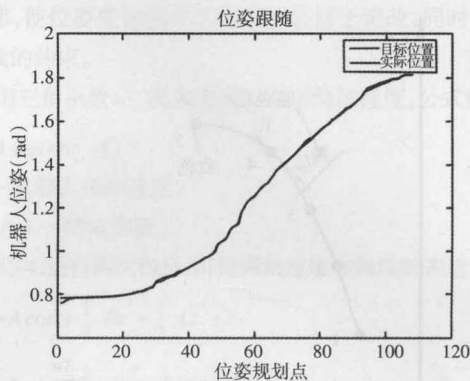
全向轮底盘机器人已参加2013年亚太机器人国内选拔赛,并在赛场上有良好的运动控制效果,满足了比赛的定位、导航需求。文中提出的定位、导航系统在全向移动机器人领域也有一定的应用价值。



(a) 机器人速度规划曲线



(b) 机器人位置跟踪



(c) 机器人位姿跟踪

图7 机器人路径跟踪效果

Fig.7 Robot Path Tracking Effect

参考文献

- [1] 陈骏,周建军.运用曲率参数优化的全向轮滚子廓型设计[J].现代制造工程,2012(10):90-94.
(Chen Jun,Zhou Jian-jun.A profile design based on curvature parameters optimization for omni-direction wheel rollers [J].Modern Manufacturing Engineering,2012(10):90-94.)
- [2] 牟学刚,朱劲,蒋平.三轮全向足球机器人结构设计与系统模型研究[J].机械与电子,2006(5):38-41.
(Mu Xue-gang,Zhu Jin,Jiang Ping.Research on Structural Design and Modeling of a Three-wheel Omni-directional Soccer Robot[J]. Machinery & Electronics,2006(5):38-41.)
- [3] 王赞.MiroSot 足球机器人的路径规划研究[D].广州:广东工业大学,2007.
(Wang Yun.Path-planning research of MiroSot soccer-robot[D].Guangzhou: Guangdong University of Technology,2007.)
- [4] 叶锦华,吴海彬,陈天炎.移动机器人运动控制系统研究[J].机械设计与制造,2008(6):145-147.
(Ye Jin-hua,Wu Hai-bin,Chen Tian-yan.The research on motion controller of mobile robot [J].Machinery Design & Manufacture,2008 (6):145-147.)
- [5] 邓星钟.机电传动控制[M].武汉:华中科技大学出版社,2007.
(Deng Xing-zhong.Mechanical and Electrical Transmission Control [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press,2007.)
- [6] 陶永华,尹怡欣,葛芦生.新型PID控制及其应用[M].北京:机械工业出版社,1998.
(Tao Yong-hua,Yin Yi-xin,Ge Lu-sheng.New PID Control and Application [M].China Machine Press,1998.)
- [7] Jean J.Labrosse. MicroC/OS-II The Real-Time Kernel[M].Second Edition, 2003.
- [8] 朱剑.基于DSP与USB的移动机器人运动控制系统研究与开发[D].青岛:山东大学,2008.
(Zhu Jian.Research and development of the mobile robot's motion control system based on DSP and USB[D].Qingdao: Shandong University,2008.)
- [9] Hooman S,Abdollahi A,Hossein O,Saeed R.Design and development of a comprehensive omni-directional soccer player robot[J].International Journal of Advanced Robotic Systems,2004,1(3):191-200.