

## 室内环境中脑控轮椅的路径跟踪控制

张浩, 李远清, 张瑞, 晏勇勇

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广州 510640)

**摘要:** 为了实现室内环境中脑控轮椅的自主导航, 提出了一种简单有效的路径跟踪控制方法; 给定的路径通常被表示为一系列离散点, 根据这一特点, 提出了分段直线路径跟踪方法, 即依次跟踪由前后两个路径点构成的直线路径到达目标点; 基于预瞄点技术并结合模糊算法和传统的 PID 控制方法设计控制器, 完成各分段直线路径的跟踪, 并给出了有效的切换条件; 实验结果表明, 文章提出的路径跟踪控制方法能够使脑控轮椅在室内环境中精确地跟踪给定路径。

**关键词:** 路径跟踪; 模糊控制; 比例积分微分控制; 脑控轮椅

## Path Tracking Control of Brain-controlled Wheelchair under Indoor Environment

Zhang Hao, Li Yuanqing, Zhang Rui, Yan Yongyong

(College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to achieve autonomous navigation for brain-controlled wheelchairs under indoor environment, a simple and effective path tracking control method is presented. The given path is usually expressed as a series of discrete points, according to this, a piecewise straight path tracking method is proposed, i. e., track the straight path constituted by two adjacent path points successively to reach the target point. Based on the preview point technology, as well as the combination of fuzzy algorithm and traditional PID control method, the controller is designed to complete the tracking of each piecewise linear path, in addition, an efficient switching condition is given. Finally, experiments are run to testify the proposed path tracking control method and experimental results show that the method can preserve the wheelchair on its desired path precisely under indoor environment even though the disturbance level is of high value.

**Keywords:** path tracking; fuzzy control; PID control; brain-controlled wheelchair

## 0 引言

脑控轮椅是一种基于脑机接口技术的新型智能轮椅, 它与普通轮椅的不同之处在于它的行驶是由用户脑电信号控制<sup>[1]</sup>。脑控轮椅具有躲避障碍、自主导航等功能, 能够为那些思维正常但行走、说话及动手能力严重丧失的重症瘫痪病人提供一种性能优越的代步工具, 提高他们独立生活的能力。

由于室内环境复杂, 脑控轮椅的可通行范围一般比较窄, 为了准确安全地行驶至目的地, 脑控轮椅必须能够精确地跟踪规划的路径。对于路径跟踪问题, 国内外学者进行了大量的研究。文献 [2] 提出了一种基于反馈线性化的自适应控制算法, 有良好的性能, 但是算法性能对模型的参数有很大的依赖性。文献 [3] 将滑模变结构控制方法应用于轮椅的轨迹跟踪。文献 [4] 采用模糊逻辑控制技术, 不需要精确的数学输入输出模型。文献 [5] 运用经典的 PID 控制方法和预瞄点技术控制智能轮椅完成过门实验, 但是要求控制变量线速度保持恒定, 不能根据实际情况进行变速, 而且算法性能只是通过仿真实验说明。

本文主要研究脑控轮椅在模型参数未知和不确定干扰下的全局路径跟踪问题, 提出了一种分段直线路径跟踪方法, 并通过脑控轮椅自主导航实验验证了该方法的有效性。

## 1 路径跟踪策略

如图 1 所示, 用一系列离散点  $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), \dots, P_N(x_N, y_N)$  表示给定的路径, 其中  $P_1(x_1, y_1)$  是起点,  $P_N(x_N, y_N)$  是目标点。

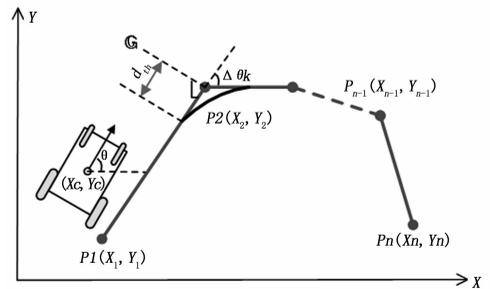


图 1 分段直线路径跟踪方法

分段直线路径跟踪方法就是首先将规划的离散路径点拟合为连续的折线路径, 然后依次跟踪每一分段直线路径直至终点。具体思路如图 1 所示, 脑控轮椅首先沿着直线  $P_1P_2$  到达  $P_2$ , 然后从  $P_2$  出发到达下一段的终点, 以此类推, 直至终点。这样, 复杂的脑控轮椅路径跟踪问题就简单化了, 转化为对直线路径的跟踪。只要能够很好的跟踪每一段直线路径, 脑控轮椅就能顺利地到达目的地。

收稿日期: 2014-06-02; 修回日期: 2014-07-08。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA011601); 国家自然科学基金(91120305)。

作者简介: 张浩(1990-), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要从事脑机接口方向的研究。

李远清(1966-), 男, 湖南人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事脑机接口、脑电信号处理方向的研究。

分段直线路径跟踪的关键在于对两段直线路径切换处的控制。如图 1 所示, 直线路径  $P_1P_2$  到  $P_2P_3$ , 方向角变化了  $\Delta\theta_K$ 。为了避免在跟踪过程中脑控轮椅的方向发生急剧变化和出现超调, 脑控轮椅需要从直线路径  $P_1P_2$  平滑地过渡到直线路径  $P_2P_3$ 。所以在脑控轮椅距转折点  $P_2$  还有一段路程  $d_{th}$  时, 就应开始跟踪下一段直线路径  $P_2P_3$ 。所以, 关键问题是对距离提前量  $d_{th}$  的确定。经过分析可知,  $d_{th}$  的大小主要与两段直线路径的角度变化量  $\Delta\theta_K$ , 车速  $v$  和反馈控制的时延  $\tau$  有关。本文根据脑控轮椅的实际情况和圆弧导引曲线确定  $d_{th}$ :

$$d_{th} = v\tau + \tan\left(\frac{1}{4} |\Delta\theta_k|\right) \quad (1)$$

为了克服在实际应用中因为误差大导致路径不能顺利切换的问题, 提出了切换域的概念。即如图 1 所示, 在当前段轨迹终点处引出一条射线  $P_2G$ , 当轮椅位置距离  $P_2G$  小于切换距离  $d_{th}$  时开始跟踪下一条直线路径。具体算法步骤可总结如下:

- 1) 计算轮椅位置与射线  $P_2G$  之间的距离  $d$ ;
- 2) 当  $d < d_{th}$  时开始跟踪下一段直线路径, 否则继续跟踪当前段直线路径, 返回步骤 1。

为了确保脑控轮椅快速准确地跟踪直线路径, 本文采用了基于反馈控制的 PID 控制方法和模糊算法。下面将详细介绍控制器的设计。

## 2 控制器设计

在本文中, 脑控轮椅的控制向量选取为  $[v, \omega]^T$ ,  $v$  为轮椅线速度, 控制轮椅的前进,  $\omega$  为轮椅角速度, 控制轮椅的转向。为了使轮椅能够从任意初始位置  $P_0(x_0, y_0)$  到达任意目标位置  $P_g(x_g, y_g)$ , 其控制向量必须被实时计算。模糊控制可以利用人们对被控对象的一些经验和规则进行自动推理; 经典的 PID 控制结构简单、稳定性好<sup>[6]</sup>。结合二者的优点并考虑控制量的特点, 脑控轮椅的线速度采用模糊算法进行控制, 角速度则采用 PID 控制方法。下面将详细介绍角速度控制器和线速度控制器的设计。

### 2.1 角速度控制

如图 2 所示,  $P_k(x_k, y_k)$  为当前段直线路径的起点,  $P_{k+1}(x_{k+1}, y_{k+1})$  为终点,  $P_c(x_c, y_c)$  是脑控轮椅的当前时刻坐标。为了预先响应脑控轮椅误差的变化, 在轮椅前进方向上距轮椅中心  $L$  处定义了预瞄点  $F$ 。离散 PID 控制器的输入是位置误差即轮椅预瞄点  $F$  到当前段直线路径之间的距离  $D_{err}$ ,

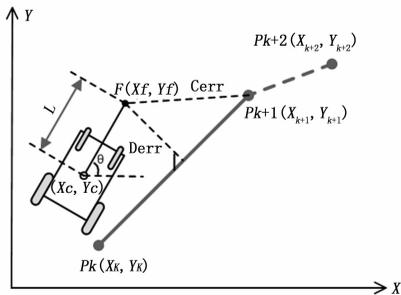


图 2 直线路径跟踪

输出为轮椅角速度  $\omega$ , 当前  $k$  时刻角速度  $\omega$  输出为:

$$\omega = k_p D_{err,k} + k_i T_s \sum_{i=1}^k D_{err,i} + k_d / T_s (D_{err,k} - D_{err,k-1}) \quad (2)$$

式中,  $T_s$  为采样时间,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,  $K_d$  为微分系数,  $D_{err}$  是当前时刻预瞄点  $F$  到当前段直线路径之间的距离。

$$D_{err} = \frac{(y_k - y_{k+1})x_f + (x_{k+1} - x_k)y_f + (y_{k+1}x_k - y_kx_{k+1})}{\sqrt{(y_k - y_{k+1})^2 + (x_{k+1} - x_k)^2}} \quad (3)$$

预瞄点  $F$  可以表示如下:

$$\begin{aligned} x_f &= x_c + L\cos\theta \\ y_f &= y_c + L\sin\theta \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $L$  的确定与脑控轮椅的线速度有关, 可以表示为  $L = tv$ ,  $t$  为预瞄时间, 预瞄时间通常取  $0.5 \sim 2.0$  s<sup>[7]</sup>。

角速度控制器设计的关键问题是 PID 参数的整定和预瞄点的确定。本文首先通过仿真试验使用试凑的方法确定 PID 参数, 然后在实际脑控轮椅上试验调整各参数使其达到最佳。预瞄点的确定与脑控轮椅的线速度和预瞄时间有关, 下面就脑控轮椅的线速度控制器进行设计。

### 2.2 线速度控制

线速度控制器采用典型双输入单输出模糊控制器, 输入为脑控轮椅预瞄点与跟随路径之间的偏差  $D_{err}$  和轮椅预瞄点到所跟随直线路径终点的距离  $C_{err}$ , 输出为轮椅的线速度  $v$ 。脑控轮椅线速度控制的好坏直接影响误差补偿的速度, 进而影响跟踪的效果。定义线速度  $v$  的论域为  $[0, 1]$ ,  $D_{err}$  的论域为  $[0, 1]$ ,  $C_{err}$  的论域为  $[0, 2]$ 。为了兼顾控制系统的响应速度和精度, 对所有模糊变量均取 5 个模糊子集, 模糊集定义为  $\{Z, S, M, B, VB\}$ , 分别表示 {零, 小, 中, 大, 非常大}, 并采用三角形隶属度函数。其中, 输入变量和输出变量模糊化隶属度函数如图 3 所示。

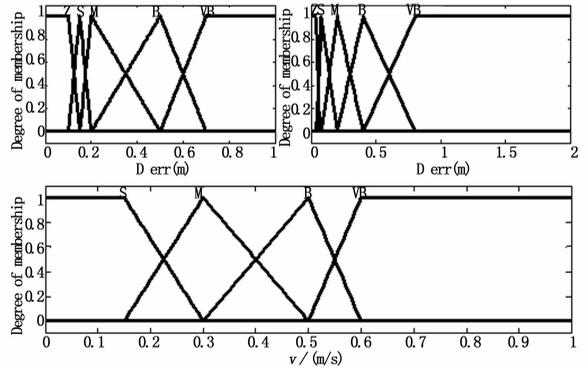


图 3 输入变量和输出变量隶属度函数

在尊重脑控轮椅非完整约束性的前提下, 考虑脑控轮椅的动态特性和人类驾驶行为, 确定模糊变量隶属函数, 通过仿真和实际实验设计出符合实际的模糊推理规则, 如表 1 所示。

表 1 线速度模糊推理规则表

$v$		$D_{err}$				
		Z	S	M	B	VB
$C_{err}$	Z	S	S	S	S	S
	S	S	S	S	S	S
	M	M	M	S	S	S
	B	B	B	M	S	S
	VB	VB	VB	B	M	S

线速度模糊控制器采用 Mamdani 模糊推理方法, 然后采用重心法解模糊化, 得到精确的线速度  $v$  输出。

### 3 实验

#### 3.1 实验平台

本文所采用的脑控轮椅平台如图 4 所示, 由两个独立的驱动轮和 4 个起支撑作用的自由轮组成, 是一个典型的非完整性机械系统。在此平台下, 用户仅需通过脑机接口技术选择目标就可以到达室内的任意位置。由图 4 中脑控轮椅路径跟踪控制结构图可知, 车载电脑首先对脑电信号进行处理并选择目标, 然后根据地图和轮椅当前位置进行路径规划, 最后由路径跟踪控制器完成路径跟踪任务到达目的地。

脑控轮椅两个驱动轮上安装有光学编码器, 用来计量车轮转动的圈数, 从而确定轮椅的角速度和线速度。激光雷达 LMS111 安装于脑控轮椅前方, 用矢量线段匹配的方法来实现轮椅的全局自定位。

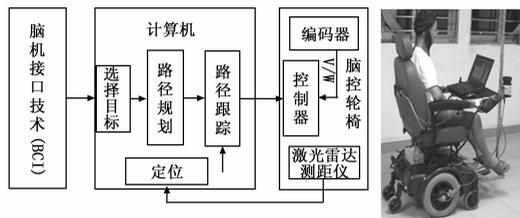


图 4 脑控轮椅结构图和实物图

#### 3.2 仿真实验

为了验证所设计路径跟踪算法的有效性和准确性, 在 MATLAB 环境下进行仿真实验。实验中跟踪的路径为脑控轮椅平台根据真实环境和目的地所规划。轮椅的初始位姿为  $[0, 0, 0]^T$ , 最大角速度为  $0.8 \text{ rad/s}$ , 最大线速度为  $1 \text{ m/s}$ , 仿真实验结果如图 5 所示。对比文章 [5] 的实验结果可知本文提出的方法能够更准确的跟踪给定路径, 并能够根据实际情况调节速度进而更快到达目的地。

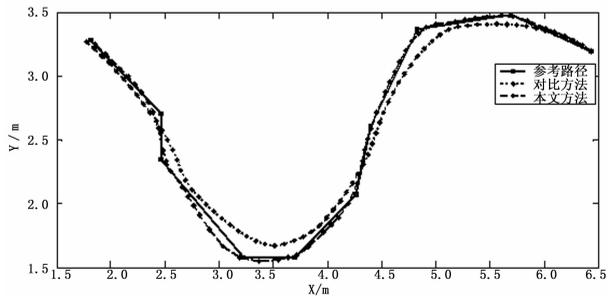


图 5 路径跟踪仿真结果

#### 3.3 实际结果

将本文提出的方法应用于脑控轮椅平台, 在室内环境下进行 3 组由简单到复杂的脑控轮椅自主导航实验。在实际测试过程中, 为了减小初始位置误差的影响, 将轮椅的初始位置定为规划路径的起始点。实验结果如图 6。在实验中生成的三条路径具有较强的代表性, 脑控轮椅可以准确地跟踪各路径到达目的地, 实验结果表明脑控轮椅在室内环境下能够跟踪各种路径。跟踪过程中, 在路径切换处跟踪误差较大, 随后脑控轮椅

便能够准确跟踪路径, 误差保持在  $[0, 0.159\text{m}]$  范围内变化。

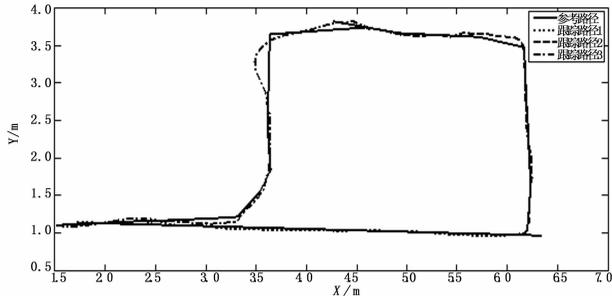


图 6 路径跟踪实际结果

通过对跟踪结果的分析可知, 脑控轮椅路径跟踪过程中自定位波动较大, 而且还受到轮椅自身的缺陷和环境的影响, 如直径不相等的车轮, 地面不平等。这些不可预测的特性相互作用使算法在实际测试中出现偏差, 但是在出现较大偏差后脑控轮椅能够迅速调整, 对误差进行补偿, 最后顺利到达目标。

### 4 结论

本文提出了分段直线跟踪的路径跟踪方法, 基于人类驾驶行为的经验设计线速度模糊控制器, 使用经典的 PID 方法控制角速度。针对分段直线跟踪方法, 设计了行之有效的切换条件, 保证跟踪的平滑性。实际仿真结果表明该方法简单有效, 能够快速精确的跟踪给定路径, 且对轮椅自定位误差及其他干扰有一定的鲁棒性。

#### 参考文献:

[1] 刘 甜, 李远清, 王洪涛, 等. 基于超声波传感器的脑控轮椅避障系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (09): 2393 - 2395.

[2] Barzamini R, Yazdizadeh A R, Rahmani A H. A new adaptive tracking control for wheeled mobile robot [A]. Robotics, Automation and Mechatronics, 2006 IEEE Conference on [C]. IEEE, 2006: 1 - 6.

[3] Solea R, Nunes U, Filipescu A, et al. Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of an Intelligent Wheelchair [J]. Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle III, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics, 2009, 32 (2): 42 - 50.

[4] Liu N. Intelligent path following method for nonholonomic robot using fuzzy control [A]. Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2009. ICINIS'09. Second International Conference on [C]. IEEE, 2009: 282 - 285.

[5] Chen L, Wang S, Hu H, et al. Bézier curve based trajectory planning for an intelligent wheelchair to pass a doorway [A]. 9th United Kingdom Automatic Control Council International Conference on Control [C]. 2012, 339 - 344.

[6] 夏嘉廷, 余忠华, 刘继忠. 基于视觉导航的智能轮椅控制系统 [J]. 计算机工程, 2011, 37 (16): 197 - 199.

[7] 李红志, 李 亮, 宋 健, 等. 预瞄时间自适应的最优预瞄驾驶员模型 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (20): 106 - 111.