

基于模糊控制的轮椅自主跟随与避障系统

杨 怡, 李文锋

(武汉理工大学 物流工程学院, 武汉 430063)

摘要: 为了减轻看护人员的负担, 设计并实现了一种基于模糊控制的嵌入式轮椅自主跟随与避障系统; 首先利用激光扫描雷达实时探测轮椅周围人员和障碍物的位置, 并结合信号强度定位方法, 将目标人员准确识别出来; 然后将目标人员和障碍物相对于轮椅的位置偏差作为输入, 利用模糊控制方法, 建立模糊控制规则, 将跟随与避障进行综合决策, 控制轮椅的线速度和角速度以实现自主跟随与避障; 实验表明轮椅能准确识别出目标人员和干扰人员, 对目标人员的跟随效果较好, 并能在跟随过程中准确避开障碍物。

关键词: 目标跟随; 模糊控制; 激光扫描雷达; 信号强度定位; 智能轮椅

Target Following and Obstacle Avoidance Wheelchair with Fuzzy Control

Yang Yi, Li Wenfeng

(School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to reduce the burden of caregivers, a target following and obstacle avoidance embedded intelligent wheelchair is designed and implemented with fuzzy control. The location of persons and obstacles around wheelchairs can be detected in real time by laser scanning radar, and the target can be identified accurately combining RSSI localization method. The position error of the target person and the obstacles relative to the wheelchair is used as the input. The fuzzy control rules are established by using the fuzzy control method, and the comprehensive decision of following and avoiding obstacles is made to control the translational velocity and rotational velocity of the wheelchair. Experiment shows that the wheelchair can identify target person and obstacles, meanwhile it can follow the target and avoid obstacles accurately.

Keywords: target following; fuzzy control; laser scanning radar; RSSI localization; intelligent wheelchair

0 引言

自主跟随与避障能让轮椅更加智能化, 减轻看护人员和轮椅使用者的操作负担。自主跟随从某种程度上来说可以看成一种特殊的人机交互方式, 机器人利用传感器对目标人员进行识别和定位, 然后进行相应决策, 控制运动速度和运动方向, 保证自身与目标人员之间的相对位置^[1]。

目前主要有两种方式实现机器人对运动目标的识别定位和自主跟随。一种是通过摄像头或者视觉传感器获取目标的图像信息, 通过图像处理方法识别目标人员, 并通过图像信息判断目标相对于机器人的远近及运动状态^[2-3]; 另一种是通过一些非视觉的相对定位方式如: 超声波^[4-5], 激光雷达^[6-7], 接收信号强度指示 (received signal strength indication, RSSI) 近场测距^[8]等, 单独使用一种或者多种组合来实现对目标的识别与定位。但是图像处理方式算法比较复杂, 对硬件设备的处理能力和内存容量要求较高。而且当机器人周围的其他人员的着装与目标人员较为相似时系统容易识别错误, 丢失目标^[9]。超声波和激光雷达等方

式只能获取周围物体的距离, 不能对不同的人员进行区分, 而 RSSI 近场测距的方式可以利用无线模块的匹配 ID 对不同人员和使用者进行区分。

本文利用激光雷达扫描探测周围的人员和物体的位置, 再结合 iBeacon 模块的信号强度 RSSI 值将目标人员识别出来, 根据目标人员和障碍物的位置信息, 利用模糊控制方法, 将跟随与避障进行综合决策, 控制轮椅的线速度和角速度以实现自主跟随与避障。

1 轮椅硬件平台

本文对现有电动轮椅控制器进行改进, 在操纵杆控制的基础上接入外部信号控制; 信号处理模块结合传感器的数据确定被跟随目标和障碍物与轮椅之间的相对位置, 利用模糊控制方法决策轮椅的运动速度, 然后通过 IIC 总线给轮椅控制器发送控制指令, 控制轮椅运动, 进而实现轮椅的自主跟随和避障。

轮椅跟随系统如图 1 所示, 在轮椅的左前方安置一个激光扫描测距雷达, 利用其对轮椅前方的人员及障碍物情况进行探测, 然后再通过轮椅左右两侧放置的两个 iBeacon 定位模块与目标人员身上的手机组成识别定位系统, 利用目标人员身上的手机与 iBeacon 定位模块进行匹配, 获取定位模块的 ID 和信号强度, 通过分析信号强度来对目标人员进行定位, 并与激光扫描测距雷达的探测结果进行比对, 将目标人员从轮椅周围的各人员与物体中识别出来, 由此

收稿日期: 2018-02-06; 修回日期: 2018-04-03。

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFG12210)。

作者简介: 杨 怡(1993-), 男, 湖北天门, 工学硕士, 主要从事智能轮椅与移动机器人技术方向的研究。

李文锋(1966-), 男, 工学博士, 教授, 主要从事无线传感器网络、物联网与机器人技术等方向的研究。

实现对目标人员的准确识别以及确定目标的位置。同时，在轮椅前方布置两个超声波传感器，探测较低的障碍物，并进行紧急避障，提高轮椅系统的安全性。



图 1 轮椅实物图

2 目标识别定位方法

2.1 激光扫描探测

本文利用 RPLIDAR A1 360 度激光扫描测距雷达对轮椅前方的人员和障碍物情况进行探测，激光扫描测距雷达安装于轮椅左前方，高度约为 90 cm，扫描频率最高可达 10 Hz，测距范围 0.15~6 m，在约 3 m 范围内可以准确测到人体，距离分辨率小于实测距离的 1%，可刚好扫描一周 360 个采样点。因激光扫描雷达的后方为轮椅使用者，对其后方的探测意义不大，故只获取前方 180 个扫描点数据，其逆时针进行扫描探测，测量示意如图 2 所示，输出的是物体相对于点 L 的极坐标：

$$p_i = (r_i, \theta_i)^T \quad i = 0, 1, \dots, 179 \quad (1)$$

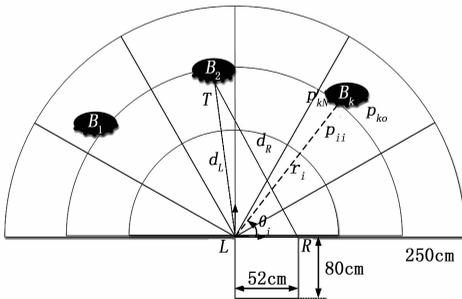


图 2 激光雷达扫描探测示意图

根据传感器的测量准确度和实际需求情况，仅对 2.5 m 内的人员和障碍物进行探测，并根据人员和障碍物的探测点的连续性，通过设定阈值，对探测到的物体的边界进行确定。当时，则认为产生边界，若，则将点作为物体的右边界点；若，则将点作为物体的左边界点。因此每个物体 B_k 均对应一组为从左到右的序列点 $(p_{k0}, p_{k1}, \dots, p_{kN})$ ，为了减少数据存储同时又能较准确的表示物体的位置，每组序列点只保留左中右 3 个扫描点，即物体 B_k 表示为 $(p_{k0}, p_{k[\frac{N}{2}]}, p_{kN})$ ，轮椅周围人员和障碍物的位置情况可描述为 B_k 的集合 $\{B_1, B_2, \dots, B_K\}$ 。

2.2 目标识别定位

由于激光扫描测距雷达只能获取目标人员与障碍物相对于轮椅的位置，而不能对目标人员与障碍物进行区分，因此利用 iBeacon 的信号强度对目标人员进行识别，目标人员身上携带的手机与轮椅上的两个 iBeacon 模块进行匹配，感知处理系统获取两个 iBeacon 模块与手机间的 RSSI 值，进行分析得出目标人员的位置，并与激光扫描测距雷达所探测到的轮椅周围情况进行比对分析，以此来对目标人员和非目标人员进行区分。

目标人员的位置的获取采用对数距离损耗模型进行 RSSI 定位^[10]，即：

$$P(dB) = P(d_{EF}) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_{EF}} \right) \quad (2)$$

其中： P (dB) 为相距信号发出点 d 米处的信号衰减量， $P(d_{EF})$ 为相距信号发出点 d_{EF} 米处的信号衰减量， d_{EF} 为参考距离，单位为米， n 为具体环境下电磁波衰减因子。假设相距发出点 d 米处接受到的功率值为 RSSI，参考位置为 1 米处，即 d_{EF} 为 1 米，距离发射点 1 米处的功率值为 P_0 ，则由 (2) 式可得：

$$RSSI = P_0 - 10n \log_{10} d \quad (3)$$

通过实验对 P_0 和 n 进行标定，便可以利用目标携带手机相对于左右两个 iBeacon 模块的 RSSI 值计算出目标与左右两个 iBeacon 模块之间的距离。

在实际场景中，目标人员处于轮椅前方，故利用目标人员 T 相对于点 L 和 R 的距离 d_L 和 d_R 即可确定目标人员相对于轮椅的位置。同时激光扫描测距雷达探测到的轮椅周围物体 B_k 上各扫描点相对于点 L 的位置，物体 B_k 并非一个质点，而是以左中右 3 个扫描点进行描述 $(p_{k0}, p_{k[\frac{N}{2}]}, p_{kN})$ ，故物体 B_k 与目标 T 间的相近程度可用 B_k 的 3 个扫描点与目标 T 间的距离之和表示，即：

$$D_k = |p_{k0}T| + |p_{k[\frac{N}{2}]}T| + |p_{kN}T| \quad (4)$$

求出最小相近程度 $D_{min} = \min\{D_1, D_2, \dots, D_K\}$ ，若物体 B_m 的相近程度最小，则表示在激光扫描测距雷达探测到的轮椅周围物体中，物体 B_m 所处位置与目标信号强度发射位置最为匹配，若同时满足 $D_{min} < D_{th}$ ，则可判断物体 B_m 即为所需要跟随的目标人员，其他物体则均认为是障碍物，因激光扫描测距雷达的测距精度较高，故将激光扫描测距雷达的探测结果作为目标人员的准确位置；若 $D_{min} > D_{th}$ ，则可判断目标丢失，此种情况可能是因为目标人员与轮椅之间存在障碍物，导致激光扫描雷达没有探测到目标人员，此时控制轮椅停止，发出警报，并继续通过激光扫描雷达和 iBeacon 模块定位目标。

为了便于后续计算，将激光扫描雷达探测到的目标人员和障碍物的位置转换到轮椅坐标系中，即：

$$\begin{cases} x = x_L + r \sin \theta \\ y = y_L + r \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

其中： (x, y) 为各点在轮椅坐标系中的坐标， (x_L, y_L) 为激光扫描雷达在轮椅坐标系中的位置， (r, θ) 为各点相对于

激光扫描雷达的极坐标。

3 轮椅运动控制方法

3.1 整体控制策略

通过对轮椅的自主跟随与避障过程进行分析, 本文在模糊控制算法的基础上, 提出一种综合考虑目标人员和障碍物影响下轮椅线速度和角速度的控制策略。系统的整体控制策略如图 3 所示。

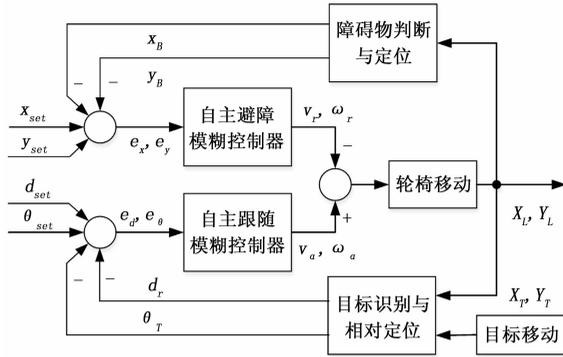


图 3 轮椅运动控制系统图

轮椅线速度和角速度的控制分为两部分, 一方面是目标移动时对轮椅产生的“吸引”作用,

(X_T, Y_T) 为目标人员的绝对坐标, 目标人员的移动会使得轮椅与目标人员之间的相对位置发生变化, 而目标人员与轮椅间的相对位置 (d_T, θ_T) 可通过传感器探测出, 与期望的目标人员和轮椅间的相对位置 (d_{set}, θ_{set}) 进行比较, 得到偏差 (e_d, e_θ) , 将此偏差作为自主跟随模糊控制器的输入, 进而决策出目标影响下的轮椅跟随线速度 v_a 和角速度 ω_a ; 另一方面是周围的障碍物对轮椅产生的“排斥”作用, 当障碍物进入到轮椅的避障决策区域后, 激光扫描雷达探测障碍物相对于轮椅的位置 (x_B, y_B) , 与期望的障碍物和轮椅间的相对位置 (x_{set}, y_{set}) 进行比较, 得到偏差 (e_x, e_y) , 将此偏差作为自主避障模糊控制器的输入, 进而决策出障碍物影响下的轮椅避障线速度 v_r 和角速度 ω_r 。最后综合目标人员和障碍物的决策结果, 得到轮椅运动速度, 线速度以前进为正方向, 角速度以逆时针为正方向。

$$\begin{cases} v = v_a - v_r \\ \omega = \omega_a - \omega_r \end{cases} \quad (6)$$

自主跟随与避障的原理如图 4 所示, 目标人员的位置取其中间的扫描点 $p_{[-\pi]}$ 的坐标。而障碍物的位置则用其横向偏差最大的扫描点的横坐标 x_B 与纵向偏差最大的扫描点的纵坐标 y_B 来表示。对于多个障碍物的情况, 选取距离轮椅最近的障碍物来进行避障决策。

3.2 模糊控制规则

根据轮椅运动过程中的跟随避障需求, 结合实际经验设定目标期望位置为轮椅正前方, d_{set} 为 200 cm, θ_{set} 为 90 度。距离偏差 e_d 的范围取 $[-40, 100]$; 角度偏差 e_θ 的范围取 $[-40, 40]$ 。轮椅横向尺寸约为 52 cm, 纵向尺寸约为 80 cm。避障决策区域为灰色方框, x_{set} 取 50 cm, y_{set} 取

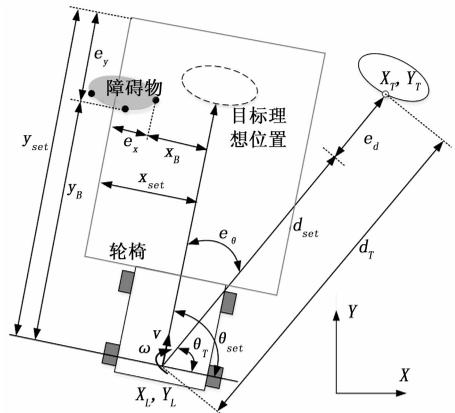


图 4 轮椅自主跟随避障原理图

330 cm; 横向偏差 e_x 范围取 $[-50, 50]$, 障碍物在左侧是正, 纵向偏差 e_y 的范围取 $[0, 200]$, 当纵向偏差大于 200 cm 时表明障碍物与轮椅距离过近, 判断为紧急避障情况, 控制轮椅紧急停止。据文献 [11] 中的研究可知, 人体的正常步行速度为 $1 \sim 1.6$ m/s, 在后退时速度较慢, 故取轮椅运动线速度范围为 $[-50, 180]$, 单位为 cm/s; 轮椅运动角速度范围为 $[-68, 68]$, 单位为度/s。

对于常见的五模糊数的模糊集合, 模糊语言集合对应的元素是 NB (负大), NS (负小), ZO (零), PS (正小), PB (正大)。为简化计算量, 采用三角形隶属度函数^[12]。各变量的隶属度函数如图 5 所示。

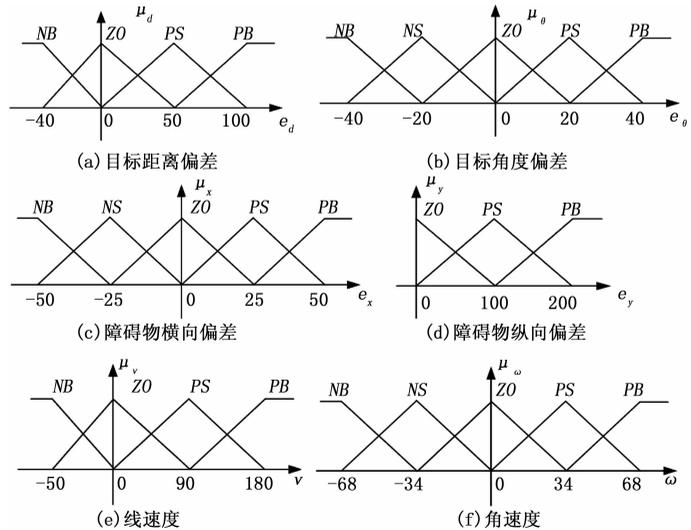


图 5 各变量的隶属度函数

模糊控制规则如表 1~4 所示。跟随线速度 v_a 主要取决于距离偏差 e_d , 角速度 ω_a 主要取决于角度偏差 e_θ 。当 e_d 为 NB 表示目标离轮椅非常近, 极有可能发生碰撞, 因此要让轮椅停止, 甚至是后退以消除这种危险情况。当 e_θ 和 e_d 均为 PB 时, v_a 并不设定为 PB 而是设定为 PS, 因为角速度和线速度同时最大时轮椅控制性能降低, 方向容易偏差, 所以降低速度, 先调整好方向。避障线速度 v_r 主要取决于横障碍物纵向偏差 e_y , 角速度 ω_r 主要取决于横向偏差 e_x 。而当 e_x 为 NB 或

PB 时,表明障碍物在轮椅正前方,因此应该将避障线速度 v_r 设置较高以降低轮椅的前进速度,通过较大的角速度迅速避开障碍物。

表 1 跟随线速度模糊规则表

v_a		e_a				
		NB	NS	ZO	PS	PB
e_d	NB	NS	NS	NS	NS	NS
	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PS	PS	PS	PB	PS	PS
	PB	PS	PB	PB	PB	PS

同时利用超声波传感器进行紧急避障,当探测到轮椅前方 50 cm 内存在物体时,马上停止轮椅,然后控制轮椅后退一段距离后整个系统再重新开始探测,防止一些突发状况造成危险,提高系统的安全性。

表 2 跟随角速度模糊规则表

ω_a		e_a				
		NB	NS	ZO	PS	PB
e_d	NB	NB	NS	ZO	PS	PB
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	PS	NB	NS	ZO	PS	PB
	PB	NB	NS	ZO	PS	PB

表 3 避障线速度模糊规则表

v_r		e_r				
		NB	NS	ZO	PS	PB
e_y	ZO	PB	PS	ZO	PS	PB
	PS	PB	PB	PS	PB	PB
	PB	PB	PB	PS	PB	PB

4 算法验证

4.1 目标识别定位实验

为验证目标识别算法的有效性,本实验在目标人员周围安排干扰人员,将算法的识别与定位结果和实际情况进行分析比较,实验场景如图 6 所示。

表 4 避障角速度模糊规则表

ω_r		e_r				
		NB	NS	ZO	PS	PB
e_y	ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS
	PB	NB	NS	ZO	PS	PB

目标人员分别位于轮椅左前方、正前方及右前方,干扰人员则位于目标人员左侧或右侧,测试 6 组数据,实验结果如表 5 所示。 T 为目标人员, B 为干扰人员。分析可知第 2 组数据中激光扫描雷达的探测结果与目标人员的实际位置误差最大,为 7.6 cm,精度较高;而 RSSI 的定位结果与实际情况还是有比较大的差距,第 3 组数据中 RSSI 定位的误差最大,为 25 cm。但是实际情况中干扰人员与目标人

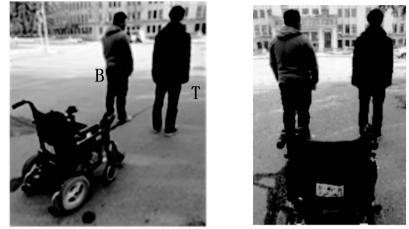


图 6 实验场景

员间的中心距离一般在 60 cm 以上,故通过 RSSI 的定位结果还是可以较为准确的区分出目标人员与干扰人员。

表 5 人员定位结果

		实际位置	激光探测	RSSI 定位
1	T	(-38,203)	(-36,198)	(-44,182)
	B	(-93,167)	(-94,163)	
2	T	(9,186)	(12,179)	(20,190)
	B	(-77,178)	(-73,174)	
3	T	(49,212)	(47,208)	(42,188)
	B	(-21,173)	(-18,167)	
4	T	(14,216)	(16,211)	(22,231)
	B	(75,199)	(80,201)	
5	T	(-13,191)	(-9,190)	(3,176)
	B	(45,182)	(48,177)	
6	T	(-58,233)	(-60,229)	(-70,243)
	B	(-5,195)	(2,198)	

4.2 自主跟随实验

为验证轮椅自主跟随与避障控制策略的有效性,目标人员沿一定路径行走,在路径周围安排干扰人员作为障碍物,测试轮椅在跟随过程中避障功能。采样周期为 100 ms,图 7 为行走路径及障碍物示意图。实验结果如图 8 和图 9 所示。

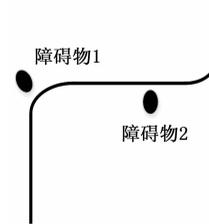


图 7 行走路径及障碍物示意图

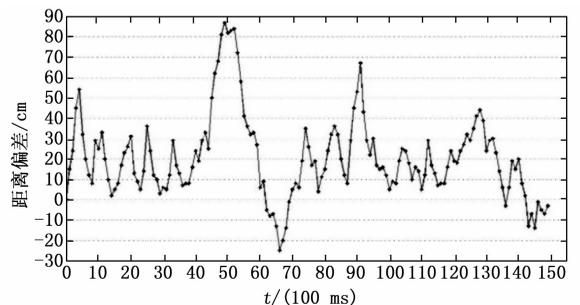


图 8 目标人员距离偏差