

doi: 10.7690/bgzd.2020.07.019

人机共存环境下巡检机器人自主移动与避障方法

李敬业, 高学山, 高锐, 梁鹏, 兰冰青
(北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要: 为提高人机混杂环境中移动机器人自主巡检效率, 提出一种基于模糊逻辑理论的避障方法。通过分析人类的社会行为规则, 结合机器人的运动特性, 建立移动机器人系统的数学模型, 将人机距离、人的行为模式和人与机器人间的相对速度参数进行模糊化处理, 得出基于模糊推理方法的机器人速度变化决策, 利用模糊控制规则, 实现模糊逻辑控制, 并通过穿越和相遇 2 种运动行为进行了实验验证。仿真结果验证了该方法具有抗干扰性和良好的避障性能。

关键词: 人机共存环境; 巡检机器人; 社会力模型; 运动行为; 模糊逻辑
中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Methods of Autonomous Movement and Obstacle Avoidance for Surveillance Robot in Man-machine Environment

Li Jingye, Gao Xueshan, Gao Rui, Liang Peng, Lan Bingqing
(School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of mobile robot autonomous inspection in human-machine mixed environment, we proposed an obstacle avoidance algorithm based on fuzzy logic theory. By analyzing the rules of human social behavior and combining the motion characteristics of the robot, established a mathematical model of mobile robot system. The human-machine distance, human behavior patterns, and relative speed parameters between human beings and robots are fuzzy so as to get the decision of robot speed regulation based on fuzzy inference method. Finally, the simulations and experiments of two motion behaviors of crossing and encountering in the man-machine hybrid environment are discussed and analyzed, and the results verify that the algorithm has anti-interference and good obstacle avoidance performance.

Keywords: man-machine environment; surveillance robot; social force model; movement behavior; fuzzy logic

0 引言

在利用移动机器人进行巡检和探测时, 由于工作环境的不确定性, 对机器人控制和感知系统的要求较高, 尤其当机器人在处于人与机动物体(如车辆、移动载体等)共存的复杂环境中进行监测作业时, 其自主巡检则是关键的技术之一, 这也是当前移动机器人领域中的一个重要研究方向^[1]。机器人巡检工作的基本行为就是自主避障^[2], 是进行高级智能行为和运动控制的基础, 更是与人共处中安全的保障。国内外现有的避障方法主要包括基于环境的可视图法、A*算法等, 以及基于信息融合的遗传算法、VFH 直方图、模糊逻辑法^[3]等。其中模糊逻辑法将信息数据以仿人的语言逻辑进行处理, 引入人类经验并简化模型。其控制性能更加适应人类社会思维, 且算法简便, 被广泛应用于机器人在非结构动态环境下的导航和避障。

考虑到共享空间的环境匹配性, 为提高人类社会中的接受程度, 移动机器人在巡检过程中需要遵守某些规则。最初的人机共存空间的研究证明了人在静态状态下的交际空间是中心对称的^[4]。后来, Gerin 等指出人类在运动过程中交际空间趋于椭圆形^[5], Scandolo 等^[6]则通过社会代价模型验证了这一理论。

笔者基于社会力模型对人类运动和进行行为进行分析, 利用模糊逻辑控制原理, 提出一种适用于社会空间的人性化巡检方案。通过障碍物不同运动趋势下的仿真和实验, 建立合理的输入输出隶属度函数。

1 移动机器人架构

1.1 移动机器人系统结构

笔者设计的移动巡检机器人是一种能够绕中心垂直轴自由旋转的六轮轮式机器人, 3 维模型如图 1 所示。它主要由中部两侧轮毂电机作为驱动轮, 前

收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-04-27

作者简介: 李敬业(1995—), 男, 河南人, 硕士, 从事移动机器人技术研究。E-mail: lijingye0831@163.com。

后 4 个全向轮作为支撑轮。机器人底盘内部搭载控制板、驱动器、电池等；上部云台搭载摄像头，前端搭载 2 组超声波传感器以获取障碍物信息。

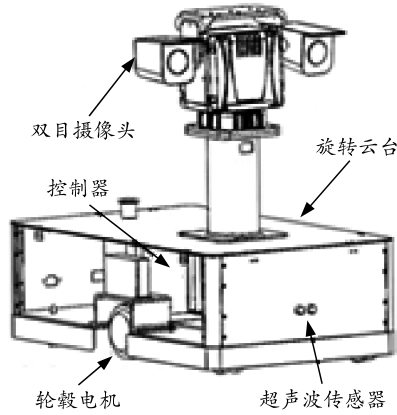


图 1 移动机器人外观

如图 2 所示，机器人控制系统结构采用感知层、决策层和执行层 3 层式结构^[7]。感知层主要包括采集数据的各类传感器，2 组传感器采用单循环工作模式，可减少因超声波互扰而出现的失真现象。决策层由 1 台搭载 Ubuntu 系统的 Raspberry Pi3 组成，负责接收传感器采集的数据，对运算进行推理，从而产生决策数据。执行层包括 1 块 STM32F103 单片机和驱动器，根据执行决策层给出的指令使机器人完成人机共存环境下的巡检任务。

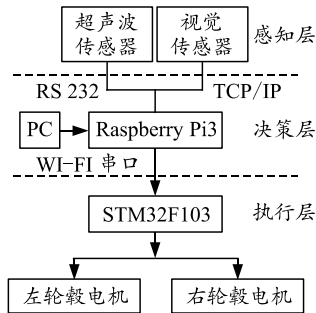


图 2 控制系统结构

1.2 移动机器人建模

为了实现移动机器人在人机共享空间的轨迹控制、避让模式、人机相对位置控制，需要给出机器人的运动特性。假设机器人和空间中障碍物在同一 2 维水平面运动，轮子与地面不存在滑动。如图 3 所示，在 $R_n\{OXY\}$ 坐标系下，该系统的非完整约束系统运动学建模表达式为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r/2)\cos\psi & (r/2)\cos\psi \\ (r/2)\sin\psi & (r/2)\sin\psi \\ -r/d & r/d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_l \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： r 为左右轮半径； d 为两车轮之间的距离； ω_r

和 ω_l 分别为左右车轮的角速度； (\dot{x}_G, \dot{y}_G) 为机器人中心对称点 G 在 $R_n\{OXY\}$ 坐标系下的投影坐标； ψ 是机器人速度与 X 轴的夹角。式(1)可简化为

$$\dot{h} = J(\psi)v \quad (2)$$

其中： $h \in R_n$ ，是 R_n 坐标系下的坐标向量； $J(\psi)$ 是一个奇异矩阵；向量 $v \in R_m$ 代表系统局部坐标系内的输入向量。

假设移动机器人在水平表面移动，轮子与地面的不产生打滑现象且不存在垂直扰动，建立机器人的力与力矩模型。机器人结构与运动参数如图 3。

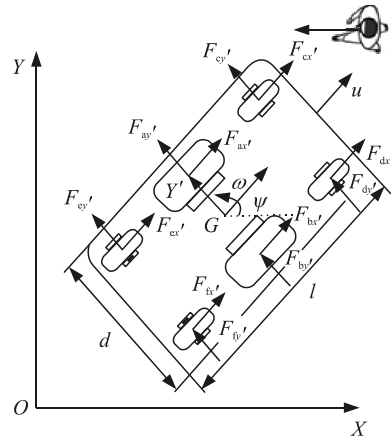


图 3 移动机器人图解

移动机器人的力、力矩方程为：

$$\Sigma F_{x'} = m\dot{u}_x = F_{ax'} + F_{bx'} + F_{cx'} + F_{dx'} + F_{ex'} + F_{fx'} \quad (3)$$

$$\Sigma F_{y'} = m\dot{u}_y = F_{ay'} + F_{by'} + F_{cy'} + F_{dy'} + F_{ey'} + F_{fy'} \quad (4)$$

$$\Sigma M_z = I_z \dot{\omega} = \frac{d}{2}(F_{ax'} - F_{bx'}) + \frac{d}{2}(F_{dx'} + F_{fx'}) - \frac{d}{2}(F_{cy'} + F_{ey'}) - \frac{l}{2}(F_{cx'} + F_{fx'}) + \frac{l}{2}(F_{cx'} + F_{dx'}) \quad (5)$$

其中 I_z 为机器人系统沿 G 轴垂直方向的惯性矩。机器人的线速度 u 、角速度 ω ，由下式得出：

$$u = (2\omega_l - 2\omega_r)/d; \quad \omega = (r\omega_l - r\omega_r)/d \quad (6)$$

两侧轮毂电机是相同的，因此，忽略电感上的电压得到的电机模型^[8]为：

$$\tau_r = k_a(v_r - k_b\omega_r)/R_a; \quad \tau_l = k_a(v_l - k_b\omega_l)/R_a \quad (7)$$

其中： v_r 和 v_l 为施加于左右电机的输入电压； k_b 为电压常数乘以传动比； R_a 为电阻常数； τ_r 和 τ_l 为左右电机扭矩乘以传动比； k_a 是扭矩常数乘以传动比。驱动轮的动力学方程为：

$$I_e \dot{\omega}_r + B_e \omega_r = \tau_r - F_{ax'} r, \quad I_e \dot{\omega}_l + B_e \omega_l = \tau_l - F_{bx'} r \quad (8)$$

式中 I_e, B_e 为组合电机转子、车轮的转动惯量和粘滞摩擦系数。由式(3)–(8)，忽略扰动的不确定性，得到移动机器人系统的动力学模型：

$$M(\zeta)\dot{\mathbf{v}} + C(\zeta, \mathbf{v})\mathbf{v} = \mathbf{v}_{ref} \quad (9)$$

其中： $M(\zeta)$ 为机器人系统的惯性常数； $C(\zeta, \mathbf{v})$ 为向心力的分量； \mathbf{v} 为系统速度的矢量； \mathbf{v}_{ref} 为机器人速度控制信号的矢量； ζ 为动态参数向量，包含机器人动力学的物理、机械和电气参数。

移动机器人系统的数学模型由式(2)和式(9)表示，可为模糊逻辑计算所获得的机器人速度参考值提供输入信号数据。机器人运动学和动力学的分析分别为模糊推理控制器速度，驱动力等参数调节和巡检方案制定提供理论依据。

1.3 人机交际空间

根据已有的交际空间的研究，将个人在运动过程交际空间建模为椭圆形点集合^[5]：

$$D_r = \begin{bmatrix} x(\alpha_i) \\ y(\alpha_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos f_r & -\sin f_r \\ \sin f_r & \cos f_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_r \cos \alpha_i \\ e_i \sin \alpha_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中：角 α_i 确定了点 (x_m, y_m) 的位置； e_r, e_i 分别是该椭圆形的长轴和短轴；角 f_r 定义了人的姿态。

2 人一机共存环境下的巡检方法

2.1 巡检方法概述

机器人的巡检方式在保证不与人类产生碰撞的同时，还要与人类保持合理的安全范围，防止人类出现“危机感”。在制定机器人巡检规则时，可将共享空间下的人类设定为干扰体，而在人类思维中，通常会采用调节移动方向和速度的方式来躲避干扰体。考虑到人类环境中常见的场景下，譬如仓库环境下的巡逻场景、餐厅环境中的定点送餐场景、商场等人员聚集场所的安防场景等，调节移动方向并不是避开障碍的最佳方式，如果采用固定点和固定航迹巡检方式则不失为一种安全有效的巡检方式；此，可制定与环境匹配的社会力模型和模糊规则，从而得到合适的调速参数。

2.2 匹配的社会力模型

一般情况下，在人机行为模型中每个人和机器人都会存在各自的局部运动目标、个体运动速度以及加速度。在建模过程中要考虑到以下 3 个力项^[7]：1) 达到期望速度的趋势的加速度项， F_{acc} ；2) 反映人和机器人交互过程中保持一定距离的边界条件的力项， F_{int} ；3) 目标对人/机器人的吸引力项， F_{att} 。

如图 4 所示，假设以上 3 个分力同时影响行人决策，借用传统的力的叠加原理，可以得到总效应力方程：

$$\Sigma F_{total} = F_{acc} + F_{int} + F_{att} \quad (11)$$

社会力模型可预测人类局部运动趋势，指导机器人行为策略，确保机器人与人之间始终保持交际空间。该社会空间由下式^[5]计算：

$$R_{r,avoid} = R_{\psi,avoid} + \mathbf{v}_{r,\psi} t, \quad d\mathbf{v}_{r,\psi}/dt = \Sigma \mathbf{F}/m \quad (12)$$

式中 $R_{r,avoid}, R_{\psi,avoid}$ 分别是机器人的躲避距离和人的躲避距离。由此，可得到基于机器人运动学模型与干涉个体运动趋势之间的关系。

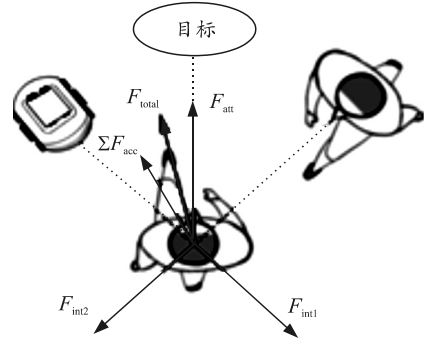


图 4 社会力模型

2.3 行为模式分析

通过个人经验以及启发式方法，根据共享空间环境下人一机的相对距离、相对运动方向、相对位置和相对速度，将人类(干扰体)的行为分为以下几种典型模式(如表 1 所示)。移动机器人按照若干典型模式，遵从相应规则以确保安全且不侵犯敏感区域。其常见的 4 种行为模式如图 5 所示。

表 1 模糊控制规则(部分)

i	人机距离				线速度		干涉行为模式				线速度增量				
	DS	DE	DN	DF	VS	VF	BS	BE	BL	BF	VD	VZ	VI	VR	VT
1	√														
2	√														
3		√													
4		√													
5			√												
6			√												
7				√											
8				√											

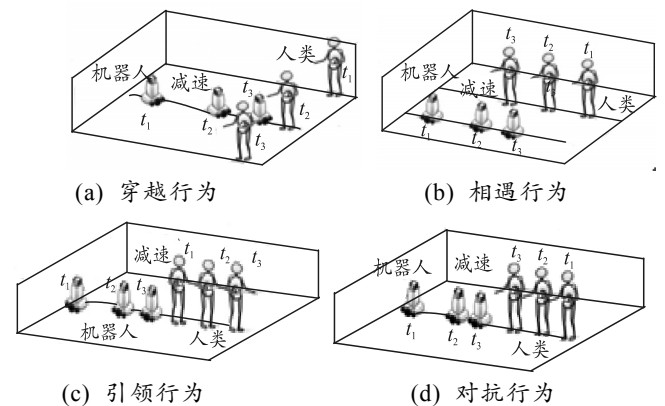


图 5 常见的 4 种行为模式

1) 穿越行为: 在人机共存场景中, 穿越行为通常出现在通道交叉口, 即在机器人的前进方向, 有干涉体从面前穿越, 此时机器人需要根据干涉体的位置与速度变化的组合来判断是等待还是通过。2) 相遇行为: 在通道场景中的一种过路行为, 机器人与干涉体正面相遇, 两者运动方向互不影响, 但可能进入双方敏感区域。3) 引领行为: 干涉体出现在移动机器人正前方, 且双方运动方向相同。4) 对抗行为: 干涉体出现在移动机器人正前方, 且双方运动方向相反。

以上 4 类行为规则都是基于无碰撞且无干扰的原则设计的, 是为了使机器人行动范围与人类保持友好状态, 互不侵犯个人敏感区域。

2.4 基于模糊逻辑的巡检方法

移动机器人的运动环境十分复杂, 很难建立精确的数学模型来预测障碍物的位置。笔者采用模糊逻辑控制法用于处理干涉物的行为运动规则和机器人具体策略。基于以上人类基本行为模式分析, 通过速度调整, 可使机器人具有类似于人类的决策能力。为实现模糊逻辑控制, 需要进行输入和输出量的模糊化、模糊推理、输出变量解模糊 3 个步骤^[5]。

1) 输入/输出变量和模糊化语言的描述。

在本次移动机器人的巡检系统中, 选取的控制器的输入量分别为人机距离 R_r 、干涉行为模式 B_i 和干涉物移动线速度 V_i , 输出量为机器人线速度增量 ΔV_{ri} 。除干涉行为模式外, 这些输入/输出量都为连续型变量, 其隶属函数可采用高斯函数进行线性化处理。

当人机距离小于当时速度下的机器人最大躲避距离 $R_{r,avoid}$ 时, 开始产生控制信号, 最小不能小于人类敏感区域, 其敏感区域边界到圆心距离为 R_{sen} 。将人机距离论域划分为 {DS DE DN DF}, 其中, DS 代表人类敏感距离, DE 代表 75% 的躲避距离, DN 代表 90% 的躲避距离, DF 代表机器人最大躲避距离, 其隶属函数由图 6(a) 表示。将干涉物移动线速度论域划分为 {VS VF}, 该语言变量分别代表“快速”“慢速”, 划分依据则根据人类正常行走速度来定, 其隶属函数由图 6(b) 表示。将干涉物行为模式论域分为 {BS BE BL BF}, 分别代表穿越行为、相遇行为、引领行为和对抗行为, 其隶属函数由图 6(c) 表示。将输出量机器人线速度增量的论域划分为 {VD VZ VI VR VT}, 分别代表原地停止, 原设定巡检速度 25%、50%、75% 和 100%, 其隶属函数

数如图 6(d) 所示。

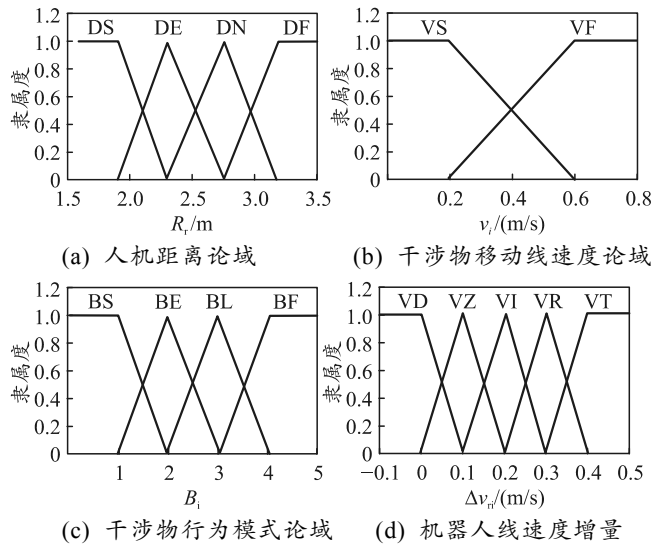


图 6 输入/输出变量隶属度函数

2) 模糊推理。

社会成员的行为被分类为 4 种模式, 针对每种模式的行为规则, 采用基于专家经验知识的 If-then 自然语句建立模糊规则库。模糊推理以输入语言为前提, 在规则库中搜寻最优结论。例如: If $R_r=DS; V_i=VS; B_i=VS$, then $\Delta V_{ri}=VD$ 。表 1 为部分模糊控制规则。

3) 模糊推理与清晰化。

通过模糊控制规则得到的是一个模糊量, 但在实际模糊控制中, 模糊量不能直接控制执行机构, 需要将其转化为精确量。用 Mandani 推理法得到均值如下:

$$\Delta V_{RO} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(\Delta V_{R_i}) \Delta V_{R_i}}{\sum_{i=1}^n \mu(\Delta V_{R_i})} \quad (13)$$

其中: ΔV_{RO} 是计算得到的机器人线速度增量; $\mu(\Delta V_{R_i})$ 是第 i 个元素对应的隶属度函数值 ΔV_{R_i} 。

3 仿真与实验

仿真分析主要考虑人类(干涉物)运动的穿越和相遇 2 种基本行为模式, 并按照该行为模式随机设置人类相对机器人以及运动起点和终点的位置。空心圆圈的轨迹代表巡检机器人运动轨迹, 实心方框的运动轨迹代表人类行走路线。为了使仿真结果清晰且方便标记参考线, 以 1 s 为单位, 对路径点进行采样分析。仿真和实验并不局限于设计使用的实验参数, 机器人和人的速度可以根据需要进行修改。

如图 7 所示, 在仿真实验 1 中, 考虑的是行人在交叉路口中常见的穿越行为模式。在这种情况下,

干涉物以 0.4 m/s 的初始速度沿设定的运动路线移动，机器人以 0.4 m/s 的初始速度进行匀速巡检工作。在 $t=4.2$ s 时，机器人检测到有干涉物从机器人移动方向右边进入到最大躲避距离区域，机器人速度采取降速策略，产生 75% 的初始速度，即 0.3 m/s，并在 $t=5.5$ s 时，速度降至最低，为 0.1 m/s。如图 8 所示，在 $t=7.6$ s 时，干涉物离开最大躲避区域，并加速到初始速度。对 $t=5$ s 时两者采样点的椭圆形社交距离的分析结果可知：机器人在与人类交会过程中，存在敏感区域重叠现象。

如图 9(a)，在穿越行为模式下的算法实验中，人与机器人的距离保持在 5 m 左右的初始位置，行人从机器人的左前方向右横穿，其速度与机器人相近。如图 9(b)，在 5 s 左右，机器人开始减速等待，此时超声波传感器测量的人机距离等于机器人躲避距离。当人穿过并离开时，机器人探测的人机距离

增大，其速度逐渐增大，由于前方墙面原因，速度没有增加至初始速度，最后原地停止。

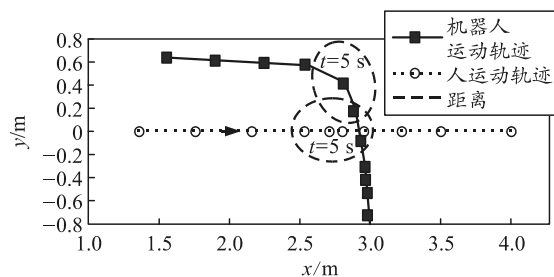


图 7 穿越行为模式下的机器人和人类障碍物轨迹仿真

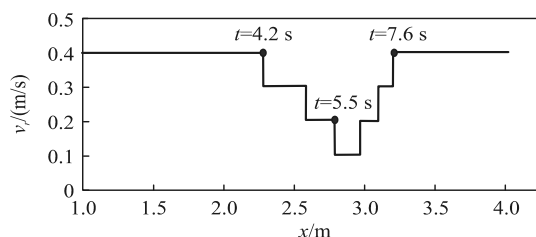


图 8 穿越行为模式下的机器人速度变化趋势

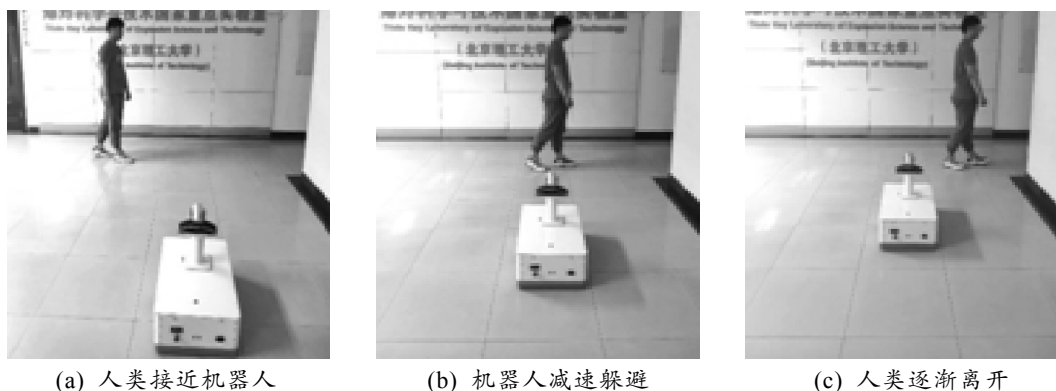


图 9 穿越行为测试实验

在仿真实验 2 中，考虑的是人们在过道中常见的相遇行为模式。如图 10 所示，当机器人巡检策略基于巡检路线不改变的前提下进行时，行人的行走路线可根据需要进行设定。障碍物移动速度为 0.4 m/s，机器人移动速度为 0.4 m/s。如图 11 所示，在 $t=4.2$ s，机器人检测到有干涉物从机器人移动方向左侧进入到最大躲避距离区域，机器人速度采取降速策略，并在 $t=6.8$ s 时，速度降至最低。在 $t=9.3$ s 时，干涉者离开，机器人又加速至原速度。

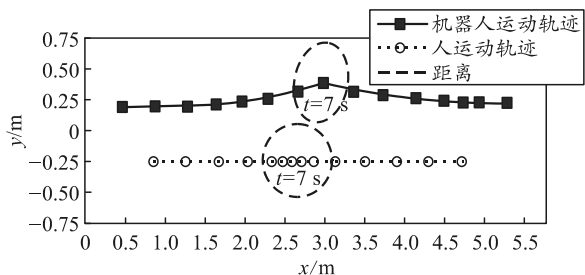


图 10 相遇行为模式下的机器人和人类障碍物轨迹仿真

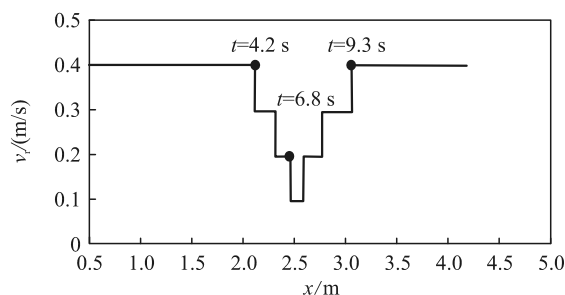


图 11 相遇行为模式下的机器人速度变化趋势

如图 12(a)，在相遇行为模式下的算法实验中，人与机器人的初始距离保持在 8 m 左右，行人从机器人的正前方向机器人左侧接近，行进速度与机器人的运动速度相近。如图 12(b)，在 4 s 左右，机器人开始减速并等待，此时超声波传感器测量的人机距离等于机器人躲避距离。最后人逐渐离开，机器人探测的人机距离增大，运动速度逐渐增加至初始速度，从而实现原轨迹下的成功避障。

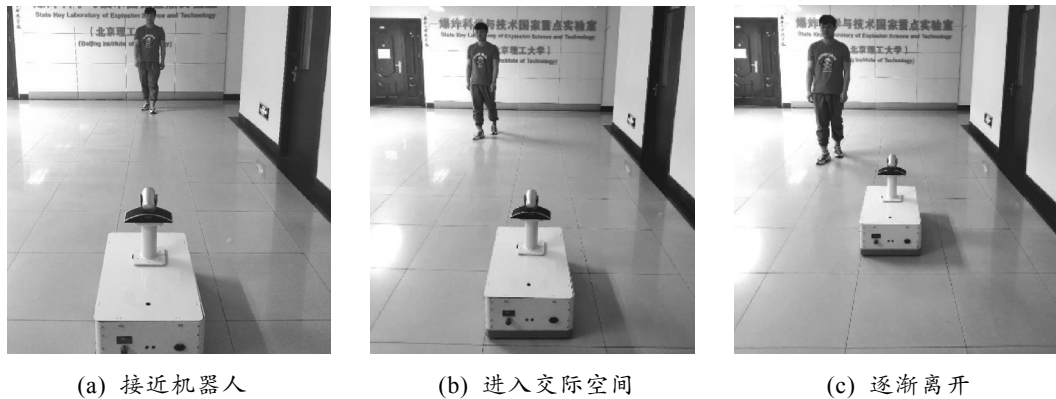


图 12 相遇行为测试实验

通过穿越和相遇 2 种干扰行为实验, 验证了该方法的良好性能。在模糊逻辑下的动态规避方面, 机器人在 2 种干扰情况下也成功避免了与人的碰撞。机器人的巡检作业可以体现为 2 种情况的干扰特性, 按照预期的避障策略能产生匹配的规避行为。经过实验结果可知: 机器人的避障策略具有快速响应性, 小范围的速度变化时延不影响避障效果。此外, 当机器人在有人的环境中移动时, 机器人和人会始终保持足够的安全距离, 以减少人对机器人产生的“危机感”。

4 结论

在人机共享空间下的动态时变环境中, 笔者通过对人类运动和行为的分析, 将其划分为 4 种典型行为模式并用模糊化语言进行描述, 并依据人类心理状态建立与环境匹配的社会力模型, 为机器人避障策略提供了一种基于社会力模型和模糊逻辑的移动机器人巡检方法。在机器人巡检轨迹不变的条件下, 通过模糊逻辑理论使机器人做出遵循社会规则的调速决策。此外, 为验证算法的有效性, 利用 Matlab 建立共享环境空间, 对人类穿越行为和相遇行为下的状态进行轨迹仿真并记录移动机器人速度变化走势。最后通过 2 次干扰模型实验, 验证了巡检方法的良好性。在人机共存环境中, 障碍物的运

动方式更为复杂。该研究对改进机器人在复杂环境中的自主行为策略提供了一种有效的实用方法。

参考文献:

- [1] 刘晓东. 安防机器人关键技术与产业化前景[J]. 无线互联科技, 2018, 15(3): 147-148.
- [2] 张玉婷, 邹彤雯, 王艳丽, 等. 自主移动机器人避障算法研究及展望[J]. 黑龙江科学, 2013, 4(7): 59-61.
- [3] 杨小菊, 张伟, 高红伟, 等. 基于模糊控制的移动机器人避障研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 51-54.
- [4] ARAUJO R, ALMEIDA A. Learning sensor-based navigation of a real mobile robot in unknown worlds[J]. IEEE Transactions on System, 1999, 29(2): 164-178.
- [5] DANIEL H, FLAVIO R, RICARDO C. Modeling and path-following control of a wheelchair in human-shared environments[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2018, 15(2): 1-33.
- [6] PHONTCHARA R, YASUSHI M, KENICHI O, et al. Human-robot collision avoidance using a modified social force model with body pose and face orientation[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2013, 10(1): 1-24.
- [7] MARTIN G, CAROL R, BRADFORD J. The negotiation of stationary and moving obstructions during walking: Anticipatory locomotor adaptations and preservation of personal space[J]. Motor Control, 2005, 9(3): 242.
- [8] 陈晓鹏, 李成荣, 李功燕, 等. 基于动力学模型的轮式移动机器人电机控制[J]. 机器人, 2008, 30(4): 326-332.