

基于行人开放度舒适模型的服务机器人路径规划^{*}

宁子豪 何丽 王宏伟 闫文龙

(新疆大学智能制造现代产业学院 乌鲁木齐 830017)

摘要:针对服务机器人在动态行人环境下难以准确理解行人意图、避障路径选择不合理的问题,提出一种行人开放度舒适模型。首先,通过扩展传统的二维对称高斯函数为非对称高斯函数,更精确地建模行人的动态舒适空间;其次,结合行人头部姿态和行人开放度特征,增强机器人对行人运动意图和社交互动关系的理解能力,从而提升导航的友好性和合理性。最后,通过仿真和真实环境下的实验对比验证,使用行人开放度舒适模型的服务机器人在路径选择上更加优化,能够主动避开行人群组的互动空间,不仅减少了与行人产生冲突的可能性,还增强了导航的平滑性和自然性,在不同场景的仿真环境中,运动时间分别缩短了1.15和2.58 s;在不同场景的真实环境中,运动时间分别缩短了1.14、2.30和0.12 s。实验结果表明,该模型能够有效使机器人适应复杂行人动态场景,提高避障效率,显著提升机器人在人机共融场景中的社交友好性和导航质量。

关键词:服务机器人;路径规划;行人开放度;行人模型

中图分类号: TN967.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.6040

Service robot path planning based on pedestrian openness comfort model

Ning Zihao He Li Wang Hongwei Yan Wenlong

(School of Intelligent Manufacturing Modern Industry, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: In order to solve the problems that it is difficult for service robots to accurately understand pedestrian intentions and unreasonable obstacle avoidance path selection in dynamic pedestrian environment, a pedestrian openness comfort model was proposed. Firstly, by extending the traditional two-dimensional symmetric Gaussian function to an asymmetric Gaussian function, the dynamic comfort space of pedestrians can be modeled more accurately. Secondly, combined with the pedestrian's head posture and pedestrian's openness characteristics, the robot's ability to understand the pedestrian's movement intention and social interaction relationship is enhanced, so as to improve the friendliness and rationality of navigation. Finally, through the comparison and verification of simulation and experiments in the real environment, the service robot using the pedestrian openness comfort model is more optimized in path selection, and can actively avoid the interactive space of pedestrian groups, which not only reduces the possibility of conflict with pedestrians, but also enhances the smoothness and naturalness of navigation, and shortens the movement time by 1.15 and 2.58 s respectively in the simulation environment of different scenes. In the real environment of different scenes, the exercise time was shortened by 1.14, 2.30 and 0.12 s, respectively. Experimental results show that the model can effectively adapt the robot to complex pedestrian dynamic scenes, improve the efficiency of obstacle avoidance, and significantly improve the social friendliness and navigation quality of the robot in the human-machine integration scene.

Keywords: service robot; path planning; pedestrian openness; pedestrian model

0 引言

在当今智能化生活的普及背景下,机器人应用的增长显著,尤其是在医疗^[1]、家庭服务^[2]、餐饮^[3]和工业巡检^[4]等领域,对机器人的需求日益增加。这一趋势反映了人们

对高效、便捷生活方式的追求,同时也提出了新的挑战,尤其是在机器人与人类交互的场景中。传统的导航系统^[5]主要关注避障和路径规划,但在复杂的人类活动环境中,这些系统往往无法满足良好的互动需求。因此,人机共融导航的重要性愈发凸显,机器人在执行任务时需兼顾人类的舒

适度和安全性。

传感器技术与人工智能的结合,使得机器人能够在复杂环境中实现自主移动和动态避障^[6]。这为机器人的人机共融导航提供了技术基础。然而,随着研究的深入,研究者们开始关注自主导航中人类的舒适度、自然性和社会性^[7],提出了多种基于社会行为的导航方法:基于社会空间关系模型^[8]、基于社会行为学习^[9]和基于行人轨迹预测^[10]。这些方法致力于在动态环境中提升机器人与人类之间的互动质量,其中较为常用的方法为社会空间关系模型^[11]。

在社会空间关系模型中,社会力模型和高斯模型是两个重要的理论框架。社会力模型基于人类社交行为,强调行人与机器人之间的相互作用,通过引力和斥力来模拟行人间的交互意图。然而,该类模型未能充分考虑行人的个体差异和动态社交状态,限制了其在复杂环境中的应用。高斯模型则采用概率分布的方法,通过分析行人的交互信息来调整机器人的社交区域。这种方法能够更好地反映行人在社交场合中的行为特征,从而提升机器人在动态环境中的导航效果。Daza 等^[12]提出使用对称高斯函数对行人进行建模,该模型使机器人遇到人群时能保持适当距离,但未能考虑到个体差异,可能导致机器人在社交环境中难以精确适应个体需求。为了便于理解和比较,本研究将该模型称为传统行人空间模型。Gines 等^[13]提出一种情绪动态空间模型,该模型在传统行人空间模型基础上,融入了行人的情绪特征。根据不同的情绪状态,行人的个人空间半径会发生变化:在积极情绪下,行人的空间半径较小;而在消极情绪下,空间半径则较大。尽管该模型能够有效减少机器人对人类社交空间的干扰,但在计算效率和真实环境适应性等方面仍存在一定的不足。Ngo 等^[14]提出一种改进行人模型,采用非对称高斯函数进行建模,并引入了行人的视角范围特征。当行人的注视方向与其相对于物体的方向之间的角度小于某一特定阈值时,该模型会扩展行人前方的潜在空间,从而防止机器人进入行人的敏感区域。这一方法确保了在人物交互过程中,机器人不会打扰行人的活动,但缺乏对行人群组动态行为的适应能力。Fang 等^[15]提出一种个人舒适距离模型,将行人建模为与速度相关的非对称高斯分布,通过整合行人运动方向、速度和空间位置,生成包含个体和群体交互信息的多层社会成本图,可以较好地描述动态环境中行人个体舒适距离变化,但该模型忽略了如手势或视线方向等其他社会行为因素,难以应对复杂的社交场景。

尽管现有的行人避障模型在移动机器人路径规划领域取得了一定进展,但在面对动态行人环境时,仍存在一定的局限性。例如未考虑手臂开放度和头部姿态等行人行为特征,这种不足在动态复杂场景下尤为明显,限制了机器人导航的效率和社会友好性。为进一步解决这些问题,本文提出一种行人开放度舒适模型,结合行人开放度和头部姿态信息,提升了机器人对行人行为的感知与理解能力。通过实验

证明,本文所提出的行人模型在动态行人环境下使机器人具有更优的避障表现和更合理的路径选择,显著改善了机器人与行人之间的交互体验,在实际场景中具有重要意义。

1 传统行人空间模型

行人舒适空间的理论最初由 Hall^[16]提出,并在机器人领域广泛应用。行人所感受到的社会空间舒适度不仅受到个人主观感受的影响,还受到一系列外部客观因素的制约。这些因素包括行人的可视范围、行走方向和速度,以及与其他行人之间的接近程度等。例如,当行人在一个开放的空间中行走时,良好的可视范围能够让他们更容易预测周围人的动作,从而增加安全感和舒适感。在行人舒适空间理论中,将人周围的空间分为 4 个主要区域,即亲密区域、个人区域、社交区域和公共区域,如图 1 所示。个人空间和私人空间所构成的行人舒适空间部分尤为重要,这是与人类交互最为密切且影响最大的区域。当陌生人侵入这一空间时,往往会使行人感到不适。

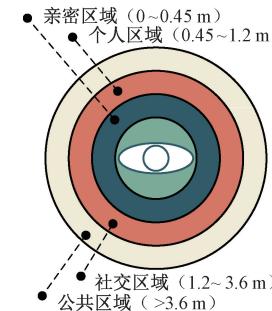


图 1 Hall 的亲近性空间理论

Fig. 1 Hall's spatial theory of proximity

行人空间模型用于预测行人个体或群体在空间中的舒适度,并对行人的心理感受进行量化分析。传统行人空间模型用二维对称高斯函数来表示,将行人对周围空间的影响建模为一个随距离指数递减的二维对称高斯函数,二维对称高斯公式数学表达式为:

$$f(x, y) = \exp\left(-\left[\frac{(d \times \cos\varphi)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(d \times \sin\varphi)^2}{2\sigma_y^2}\right]\right) \quad (1)$$

式中: σ_x 、 σ_y 是高斯函数的标准差; d 是高斯中心周围点的欧几里得距离; (x_0, y_0) 是高斯分布的中心; φ 是高斯中心到周围点的连线与 x 轴正方向之间的夹角。

传统行人模型构造的行人舒适空间如图 2 所示。对于多个行人,行人对周围空间的影响可以通过叠加多个高斯分布来实现。这种方法有效表达了行人在空间中的影响,为动态环境中的路径规划提供了参考。

2 行人开放度舒适模型

2.1 头部姿态特征

在传统行人空间模型中,行人头部朝向的动态特征通

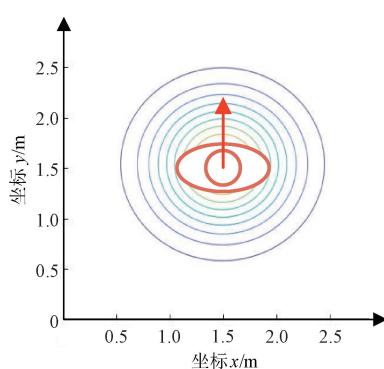


图 2 传统行人空间模型

Fig. 2 Traditional pedestrian space model

常被忽视,导致机器人在动态环境下难以准确预判行人意图,从而影响避障路径的合理性和效率。为了解决此问题,本研究首次引入行人头部姿态朝向作为关键特征,进一步丰富对行人动态状态的描述。头部朝向通常能够预示行人潜在的行进方向,为模型提供了行人意图的重要信息,使得机器人在避障时可以选择更贴近行人意图的路径,减少对行人活动空间的干扰。

如图 3 所示,先在行人坐标系 X_iY_i 中获得行人的头部朝向角 θ_i ,而后将 θ_i 转为在世界坐标系 XY 下的角度 θ_w 。

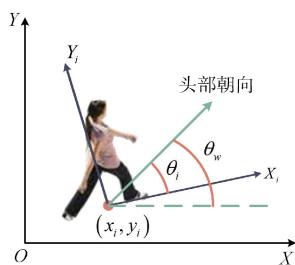


图 3 行人头部姿态朝向

Fig. 3 Pedestrian head pose orientation

2.2 行人开放度

传统行人模型在复杂环境下对行人空间需求的判断不够精确,导致选择的避障路径可能干扰行人活动空间,影响行人舒适感和避障效率。为了解决此问题,本研究首次提出行人开放度这一概念,通过描述行人周围的开放空间,使机器人能更合理地选择避障路径。

如图 4 所示,点 a 和点 d 对应行人的手腕关节点,点 b 和点 c 对应行人的肩膀关节点。左姿态开放度 $OpennessL$ 和右姿态开放度 $OpennessR$ 的数学表达如式(2)和(3)所示。

$$OpennessL = \left| \frac{[x_a - (x_b + x_c)/2]}{(x_c - x_b)} \right| \times 1.4 \quad (2)$$

$$OpennessR = \left| \frac{[x_d - (x_b + x_c)/2]}{(x_c - x_b)} \right| \times 1.4 \quad (3)$$

式中: x_a, x_b, x_c, x_d 对应 a, b, c, d 4 个关节点的横坐标。

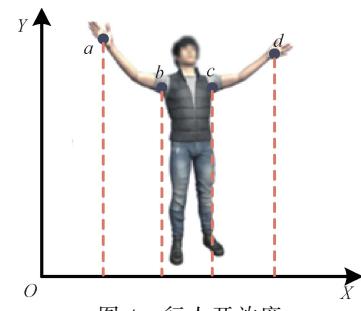


图 4 行人开放度

Fig. 4 Pedestrian openness

2.3 非对称高斯函数

标准的高斯函数在 x 轴和 y 轴上是对称的,适合于简单场景,但无法反映行人在复杂环境中的动态行为。为了能够根据行人的头部朝向、手臂开放度等信息动态调整舒适空间,更贴合实际情况,需要对高斯函数进行重新设计。首先,根据行人的朝向角构建一个本体坐标系,并将舒适空间划分为前、后、左、右 4 个象限。随后,在每个象限中应用高斯函数,通过组合这些高斯函数形成非对称高斯函数,建立的非对称高斯函数公式如式(4)所示。

$$f(x, y) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A \times e^{-\left[\frac{(d \times \cos \alpha)^2 + (d \times \sin \alpha)^2}{2\sigma_f^2} \right]}, \alpha \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \\ A \times e^{-\left[\frac{(d \times \cos \alpha)^2 + (d \times \sin \alpha)^2}{2\sigma_b^2} \right]}, \alpha \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi \right) \\ A \times e^{-\left[\frac{(d \times \cos \alpha)^2 + (d \times \sin \alpha)^2}{2\sigma_l^2} \right]}, \alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, 0 \right) \\ A \times e^{-\left[\frac{(d \times \cos \alpha)^2 + (d \times \sin \alpha)^2}{2\sigma_r^2} \right]}, \alpha \in \left[-\pi, -\frac{\pi}{2} \right] \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: A 为幅值; $\sigma_f, \sigma_b, \sigma_l, \sigma_r$ 依次对应前、后、左、右 4 个方向的方差值; α 决定行人模型的朝向,其取值规则为:

$$\alpha = \begin{cases} \varphi - \theta_w, & \text{行人静止时} \\ \varphi - \frac{\theta_v - \theta_w}{2}, & \text{行人运动时} \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_w 为行人的头部姿态朝向角, θ_v 为行人运动方向。

在运动过程中,行人的注意力更多集中在视野的前方区域;而行人的头部朝向则可能是行人感兴趣的方向;手提重物的行人则更希望机器人从另一侧通过。根据以上常见的社会行为对 4 个方向上的高斯函数方差进行定义:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_f = \sigma \times \left(\frac{k_f}{2} \times v^2 + 1.4 \right) \\ \sigma_b = \sigma \times \left(\frac{k_b}{v^2 + 1} \right) \\ \sigma_l = \sigma \times \left(OpennessL + \frac{k_l}{2} \times OpennessL^2 \right) \\ \sigma_r = \sigma \times \left(OpennessR + \frac{k_r}{2} \times OpennessR^2 \right) \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: v 表示行人的线速度, k_f, k_b, k_l, k_r 是 4 个比例系数, σ 是行人的初始舒适空间的大小。

本文分别模拟了静止状态下、运动状态下和张开双臂状态下行人动态空间模型。图 5(a)展示了静止状态下的行人开放度舒适模型, 其中行人的朝向是根据人的头部姿态估计的; 在图 5(b)中展示了静止状态时行人完全张开手臂时, 行人左侧和右侧的空间有了一定的扩展; 图 5(c)和(d)中展示了以 1.0 m/s 的速度运动的行人开放度舒适模型。

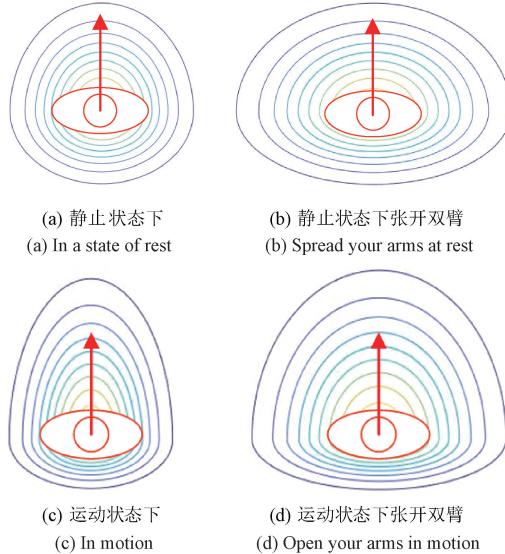


图 5 不同状况下的行人开放度舒适模型

Fig. 5 Pedestrian openness comfort model in different situations

3 仿真实验及结果分析

计算机配置和仿真实验平台为: Windows 11 专业版, 配备 x64 处理器 Intel® Core™ i9-13900 CPU 2.20 GHz, 机带 RAM 16 GB, 使用的仿真软件为 Matlab 2021b。在仿真中, 将 DWA 算法作为路径寻优算法, 对行人开放度舒适模型与无行人模型和传统行人空间模型进行了比较。

3.1 场景一仿真与分析

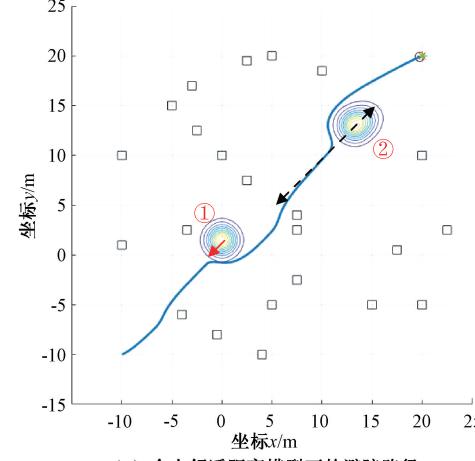
如图 6 所示, 将仿真场景设为静态行人①以及双向移动且右手提重物的动态行人②, 红色单箭头为静态行人的头部姿态朝向, 黑色双箭头虚线为动态行人②的移动范围, 设置行人②的速度为 1.2 m/s; 障碍物呈现出密集且随机分布的复杂布局。

根据图 6 及表 1 可得: 当服务机器人从起点出发躲避第 1 个行人时, 使用个人舒适距离模型的服务机器人可以预留行人潜在安全空间, 但机器人在通过行人附近时明显减速, 导致一定的速度损失。相比之下, 使用行人开放度舒适模型的服务机器人通过整合行人运动方向、速度、手臂开放度和头部姿态等信息, 能够更精确预测行人的潜在移动区域, 从而规划出更加高效的避让路径。避让完成后, 机器

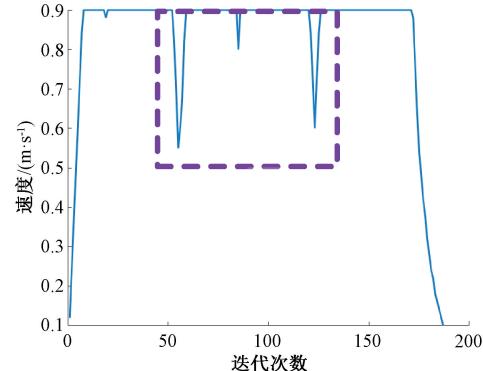
人能够迅速恢复至最大速度, 使运动时间较个人舒适距离模型缩短了 1.15 s。由此可见, 行人开放度舒适模型在复杂障碍物与行人共存的动态环境中, 凭借对多模态信息的充分利用和对动态行为的高效预测, 有效提升了服务机器人的导航效率。

3.2 场景二仿真与分析

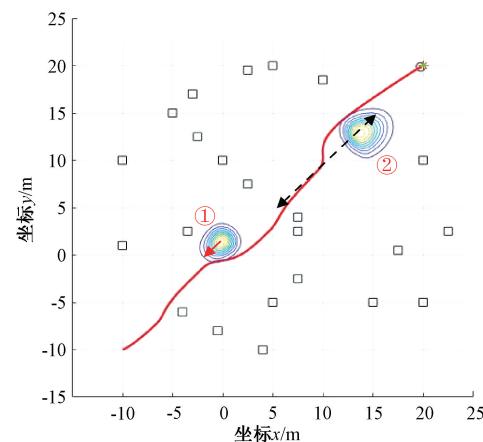
如图 7 所示, 红色箭头为静态行人②的头部姿态朝向, 黑色箭头虚线为动态行人移动路径且移动速度均为



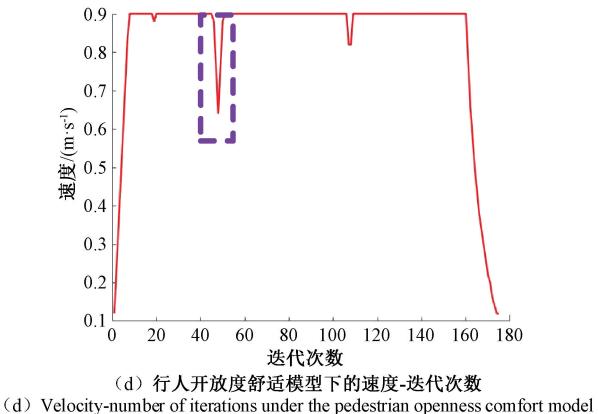
(a) 个人舒适距离模型下的避障路径
(a) Obstacle avoidance path under the personal comfort distance model



(b) 个人舒适距离模型下的速度-迭代次数
(b) Velocity under the personal comfort distance model - number of iterations



(c) 行人开放度舒适模型下的避障路径
(c) Obstacle avoidance path under the pedestrian openness comfort model



(d) 行人开放度舒适模型下的速度-迭代次数

(d) Velocity-number of iterations under the pedestrian openness comfort model

图 6 场景一仿真实验

Fig. 6 Scenario 1 simulation experiment

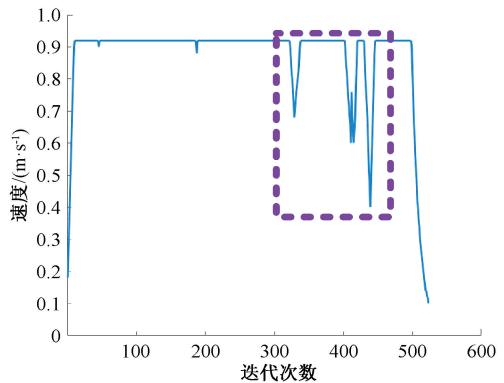
表 1 仿真实验结果

Table 1 Simulation experiment results

场景	模型名称	运动时间/s	迭代次数	路径长度/m	安全距离/m
场景一	个人舒适距离模型	31.68	182	44.36	1.35
	行人开放度舒适模型	30.53	175	43.61	1.57
场景二	个人舒适距离模型	142.34	531	90.08	1.96
	行人开放度舒适模型	139.92	522	91.83	2.59

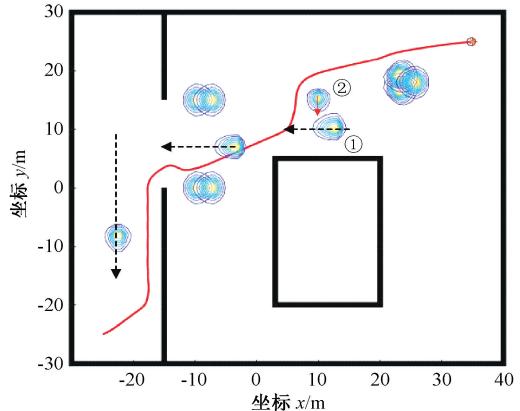
1.2 m/s, ①号行为右手提重物的动态行人。机器人依次通过走廊区域与单个动态行人并行, 并在门口遇到进行社交互动的双人群组、正常行走的行人和展板前手提重物行走的行人①, 而后是三人群组。

根据图 7 及表 1 可得: 使用个人舒适距离模型的服务机器人在向目标点移动的过程中, 由于缺乏对行人头部姿态、手臂开放度等多模态行为的综合考量, 仅依赖速度和方



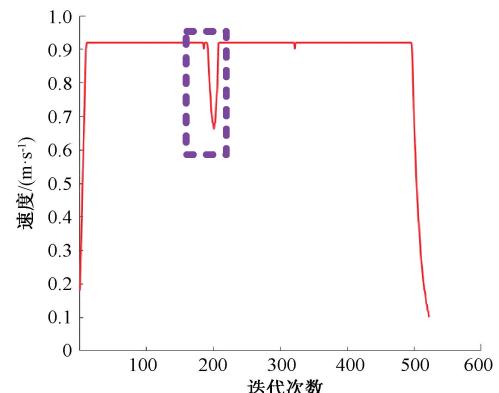
(b) 个人舒适距离模型下的速度-迭代次数

(b) Velocity under the personal comfort distance model - number of iterations



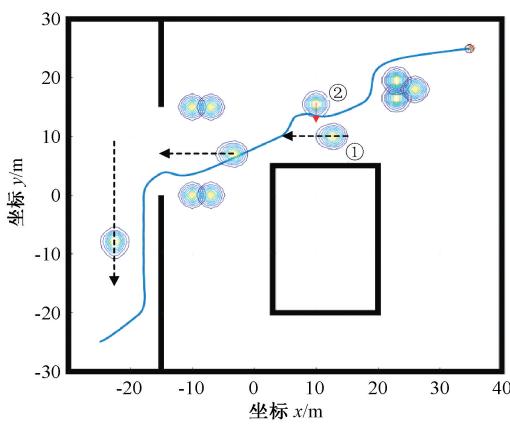
(c) 行人开放度舒适模型下的避障路径

(c) Obstacle avoidance path under the pedestrian openness comfort model



(d) 行人开放度舒适模型下的速度-迭代次数

(d) Velocity-number of iterations under the pedestrian openness comfort model



(a) 个人舒适距离模型下的避障路径

(a) Obstacle avoidance path under the personal comfort distance model

图 7 场景二仿真实验

Fig. 7 Scenario 2 simulation experiment

向建模, 在引导路径规划时未能完全避开静态行人②的潜在安全空间, 导致一定程度的速度损失。同时, 该模型在密集交互区域内的路径规划表现相对僵化, 容易出现急剧转向和频繁的紧急停止现象, 使得机器人行驶轨迹缺乏连续性和自然性。相比之下, 使用行人开放度舒适模型的服务机器人在路径规划和行为预测上表现出明显优势。首先,

通过整合多模态信息(包括行人速度、方向、手臂开放度和头部姿态),机器人能够更准确地预测行人行为和动态舒适空间范围,在密集交互区域内保持平滑的路径规划,显著减少了急剧的转向和停顿现象,整体行驶轨迹更加连续和自然。尽管路径长度略有增加,但机器人在运动时间、迭代次数和与行人保持安全距离等方面表现出优势。实验结果显示,使用行人开放度舒适模型的服务机器人运动时间较个人舒适距离模型缩短了 2.42 s。

从仿真实验表现来看,行人开放度舒适模型展现出强大的动态适应能力,尤其在复杂环境中面对多种社会交互行为并存的场景时,能够实现更加友好的交互式导航。其优越性不仅体现在路径平滑性和安全性方面,还体现在高效利用环境信息提升导航效率和人机共融性方面。

4 真机实验测试

为验证本文所提行人开放度舒适模型在真实环境下的有效性和实用性,使用搭载 Kinect V2 深度相机和 Velodyne-16 线激光雷达的松灵 Tracer 差速移动机器人进行实验。实验设备和实验环境如图 8 所示,在机器人端和个人 PC 端预装 Ubuntu 20.04 的 ROS 机器人操作系统 Noetic,目标检测^[17]用于识别行人,对象跟踪^[18]用于分析行人的运动特征,头部姿态估计^[19]用于分析行人头部朝向,将 DWA 和 A* 混合算法作为路径寻优算法。



Fig. 8 Experimental equipment and environment

在实验环境中,通过将个人计算机与机器人连接,建立了 ROS 与机器人底盘之间的通信。将行人开放度舒适模型在栅格地图中表示,如图 9 所示,地图中的每个网格被分配一个函数值,其中函数值越大,表示距离行人亲密区域越近。当机器人接近这些位置时,对行人的安全性和舒适性影响也随之增加。

4.1 场景一真机实验与分析

实验场景一中服务机器人避障路径如图 10 所示,与行人相遇时栅格地图显示如图 11 所示,在实验场景中,第 1 位行人在展板前观看展出内容,第 2 位行人路过展板,被展板内容吸引并前往观看内容。

使用个人舒适距离模型的机器人由于仅考虑行人的速度和位置,导致其路径规划直接阻碍了第 2 位行人前往展板的潜在路径,影响了行人的运动意图。相比之下,使用行

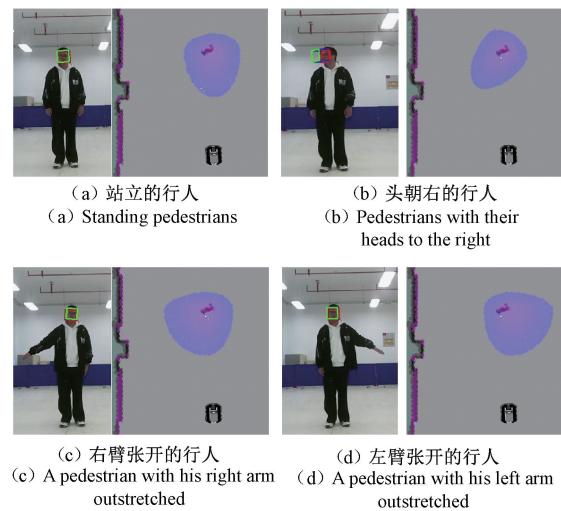
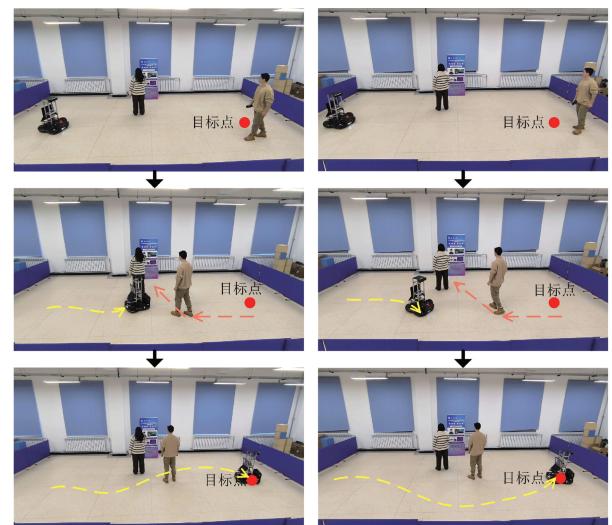


图 9 行人开放度舒适模型在栅格地图下的表现

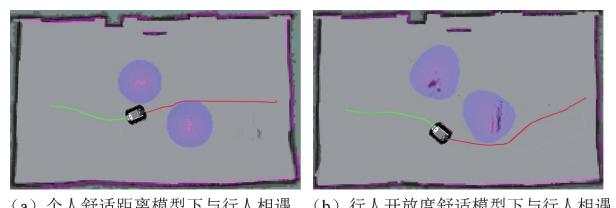
Fig. 9 Performance of the pedestrian openness comfort model on a raster map



(a) 使用个人舒适距离模型时的路径
(a) The path when using the personal comfort distance model
(b) 使用行人开放度舒适模型时的路径
(b) Paths when using the pedestrian openness comfort model

图 10 场景一中模型验证结果

Fig. 10 The model validation results in scenario 1



(a) 个人舒适距离模型下与行人相遇
(a) Meet pedestrians under the personal comfort distance model
(b) 行人开放度舒适模型下与行人相遇
(b) Pedestrian openness meets pedestrians under a comfortable model

图 11 场景一:与行人相遇时栅格地图显示

Fig. 11 Scene 1: The raster map is displayed when encountering a pedestrian

人开放度舒适模型的机器人通过融合行人头部姿态等多模

态行为特征,能够更准确预测第2位行人的运动意图及潜在路径需求。在规划自身路径时,机器人主动绕过了第2位行人可能前往的展板区域,既保证了行人运动的舒适性,也提升了机器人在复杂场景中的路径规划能力和社会适应性。

4.2 场景二真机实验与分析

实验场景二中服务机器人避障路径如图12所示,与行人相遇时栅格地图显示如图13所示,在实验场景中,两个静止的行人正在讨论文献,第3位行人被讨论内容吸引并前往加入讨论。

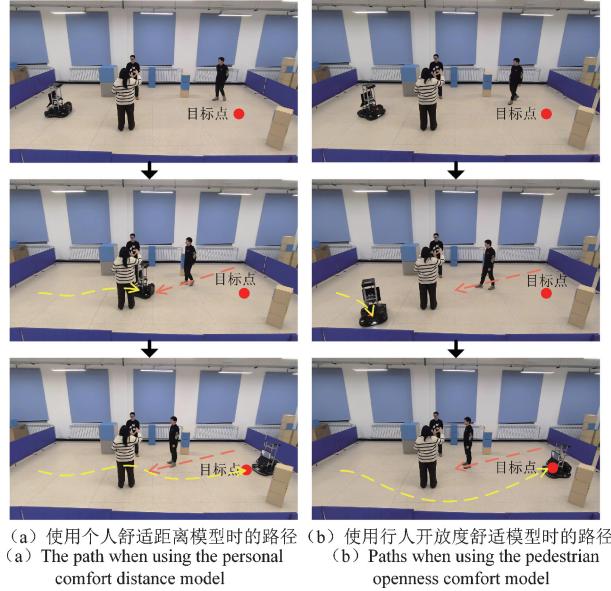


图12 场景二中模型验证结果

Fig. 12 The model validation results in scenario 2

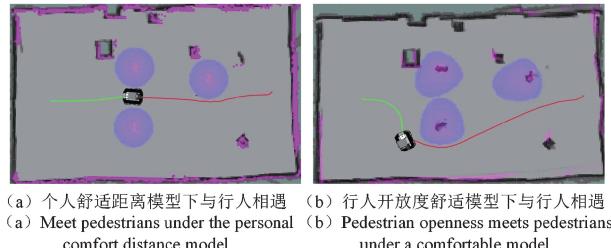


图13 场景二:与行人相遇时栅格地图显示

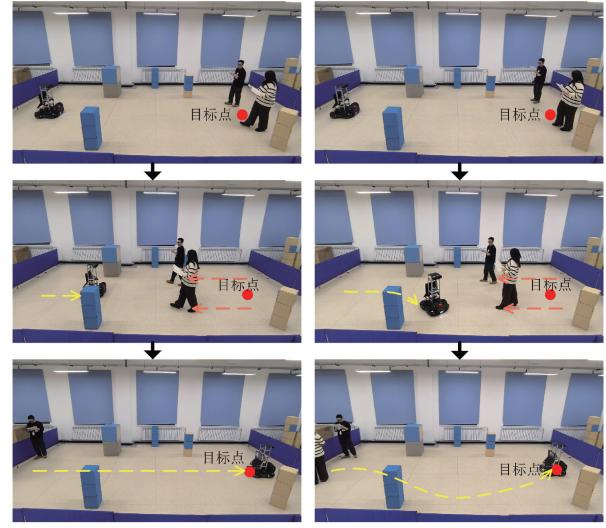
Fig. 13 Scene 2: The raster map is displayed when encountering a pedestrian

使用个人舒适距离模型的机器人由于仅考虑行人的速度和位置,无法理解两个静态行人的交互关系及第3位行人的运动意图,导致机器人直接穿过正在讨论的两名行人,并阻碍了第3位行人加入讨论的路径。相比之下,使用行人开放度舒适模型的机器人能够通过融合行人头部姿态和开放度信息,更准确地识别出两名讨论行人之间的互动特性,以及第3位行人试图加入讨论的意图。机器人规划的路径不会穿过两名正在激烈讨论的行人,同时还主动绕过了第3位行人的潜在路径,保证了行人之间的社交活动流

畅性,提升了导航的自然性和友好性。

4.3 场景三真机实验与分析

实验场景三中服务机器人避障路径如图14所示,与行人相遇时栅格地图显示如图15所示,在实验场景中,两名并排走的行人正在讨论文献。

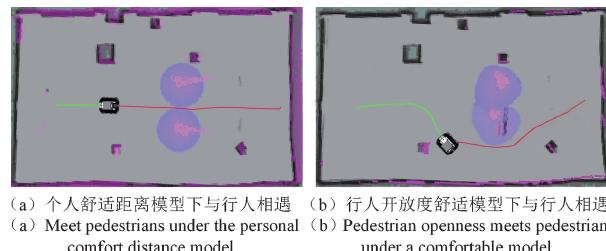


(a) 使用个人舒适距离模型时的路径
(a) The path when using the personal comfort distance model

(b) 使用行人开放度舒适模型时的路径
(b) Paths when using the pedestrian openness comfort model

图14 场景三中模型验证结果

Fig. 14 The model validation results in scenario 3



(a) 个人舒适距离模型下与行人相遇
(a) Meet pedestrians under the personal comfort distance model

(b) 行人开放度舒适模型下与行人相遇
(b) Pedestrian openness meets pedestrians under a comfortable model

图15 场景三:与行人相遇时栅格地图显示

Fig. 15 Scene 3: The raster map is displayed when encountering a pedestrian

使用个人舒适距离模型的机器人由于仅考虑行人的速度和位置,未能捕捉到两名行人之间的互动关系,导致其直接穿过正在讨论的两名行人之间的空间。相比之下,使用行人开放度舒适模型的机器人通过融合行人头部姿态和开放度等多模态行为特征,更准确地识别出两名行人之间的互动关系,扩展两人的交互区域,使机器人在做路径规划时,主动绕开两名行人,避免进入其舒适空间,从而在不打扰行人互动的前提下完成了自主导航。

对比以上真机实验及表2可以看出,行人开放度舒适模型能够使服务机器人更准确地感知和理解行人的运动状态以及群组间的互动行为,有效避免了穿越行人群组或干扰行人的行为,确保了导航路径的合理性和社会友好性,同时缩短了在动态行人环境下的运动时间。因此本文提出的

表 2 真实场景实验结果

Table 2 Simulation experiment results

场景	模型名称	运动时间/s
场景一	个人舒适距离模型	21.26
	行人开放度舒适模型	20.12
场景二	个人舒适距离模型	23.58
	行人开放度舒适模型	21.28
场景三	个人舒适距离模型	20.56
	行人开放度舒适模型	20.44

行人开放度舒适模型在服务机器人路径规划的实际应用中具有更高的适应性和实用性。

5 结 论

本文首先针对服务机器人在动态环境中难以准确理解行人行为,从而导致避障效率低下和人机交互体验不佳的问题,提出了一种行人开放度舒适模型。该模型通过扩展二维对称高斯函数、引入行人头部姿态特征和手臂开放度信息,增强了对动态行为和社交互动的建模能力。模型将行人运动方向与头部姿态相结合,优化机器人对行人潜在移动区域的预测能力;同时,通过手臂开放度来匹配行人社交互动的空间需求,使机器人能够在动态环境中避免干扰行人群组交互,选择更合理的避障路径。最后,在 MATLAB 中进行了两组仿真实验,并在真实环境下进行了三组真机实验,通过对比个人舒适距离模型与行人开放度舒适模型的实验结果,证明了本文提出的行人开放度舒适模型具有适应性和实用性,使机器人在避障过程中选择合理路径,减少了运动时间,并提升了人机共融能力。为服务机器人在人机交互复杂场景中的实际应用提供了理论支持。未来工作可以结合更多传感器数据,以进一步增强模型对多样化行为特征的识别能力。

参考文献

- [1] 伍锡如,龚璞. 基于人工磁场的防疫机器人路径规划[J]. 电子测量技术,2024,47(3):55-61.
WU X R, GONG P. Epidemic prevention robot path planning based on artificial magnetic fields [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(3):55-61.
- [2] 郑镇华,严波,周乐,等. 基于 Kano-FAST-FBS 的智能扫地机改良设计研究[J]. 包装工程, 2024, 45(18): 162-171.
ZHENG ZH H, YAN B, ZHOU L, et al. Improved design of smart sweeper based on Kano-FAST-FBS [J]. Packaging Engineering, 2024, 45(18):162-171.
- [3] 蔡军,钟志远. 改进蚁群算法的送餐机器人路径规划[J]. 智能系统学报,2024,19(2):370-380.
CAI J, ZHONG ZH Y. Path planning of a meal

delivery robot based on an improved ant colony algorithm [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2024, 19(2):370-380.

- [4] 巫宇航,王强,肖瑶,等. 燃气管道巡检四足机器人的改进沙猫群优化 SLAM 算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(10):128-136.
WU Y H, WANG Q, XIAO Y, et al. Study on improved sand cat swarm optimized SLAM algorithm for gas pipeline inspection quadruped robot[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10):128-136.
- [5] 袁新亚,戴娟,孙胜强,等. 融合 A* 和 DWA 算法的移动机器人路径规划方法[J]. 电子测量技术,2024, 47(4): 95-103.
YUAN X Y, DAI J, SUN SH Q, et al. Integration of A* and DWA algorithms for mobile robot pathplanning[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47 (4): 95-103.
- [6] 万怡华,张雪梅. 混合多策略改进蜣螂算法的避障路径规划[J]. 电子测量技术,2024,47(2):69-78.
WANG Y H, ZHANG X M. Obstacle avoidance path planning of hybrid multi-strategy improved dungbeetle optimizer[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(2):69-78.
- [7] 何丽,张恒,袁亮,等. 服务机器人社会意识导航方法综述[J]. 计算机工程与应用,2022,58(11):1-11.
HE L, ZHANG H, YUAN L, et al. A review of socially-aware navigation methods of service robots[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(11): 1-11.
- [8] 孙月,吴仕超,刘景泰. 面向共融机器人的交互意图理解与机器人主动舒适交互[J]. 人工智能,2022(3): 113-122.
SUN Y, WU SH CH, LIU J T. Interaction intent understanding for inclusive robots and active and comfortable interaction with robots [J]. Artificial Intelligence, 2022(3):113-122.
- [9] BACHILLER P, RODRIGUEZ C D, JORVEKAR R R, et al. A graph neural network to model disruption in human-aware robot navigation [J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(3): 3277-3295.
- [10] SATHYAMOORTHY A J, PATEL U, GUAN T, et al. Frozone: Freezing-free, pedestrian-friendly navigation in human crowds[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4352-4359.
- [11] MALVIYA A, KALA R. Social robot motion planning using contextual distances observed from 3D human motion tracking [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 184: 115515.

- [12] DAZA M, BARRIOS A D, DIAZ A J, et al. An approach of social navigation based on proxemics for crowded environments of humans and robots [J]. *Micromachines*, 2021, 12(2): 193.
- [13] GINES J, MARTIN F, VARGAS D, et al. Social navigation in a cognitive architecture using dynamic proxemic zones[J]. *Sensors*, 2019, 19(23): 5189.
- [14] NGO H Q, LE V N, THIEN V D, et al. Develop the socially human-aware navigation system using dynamic window approach and optimize cost function for autonomous medical robot[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, 12(12): 1400-1405.
- [15] FANG F, WANG X K, LI Z C, et al. A unified framework for pedestrian trajectory prediction and social-friendly navigation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 71(9):11072-11082.
- [16] HALL E T. *The Hidden Dimension: Man's Use of Space in Public and Private*[M]. New York: Anchor Books Press, 1966.
- [17] 李可新,何丽,刘哲凝,等.基于跨模态特征融合的RGB-D显著性目标检测[J].*国外电子测量技术*,2024,43(6):59-67.
- [18] LI K X, HE L, LIU ZH N, et al. RGB-D salient object detection based on cross-modal feature fusion [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 43(6):59-67.
- [19] LIU ZH N, HE L, YUAN L, et al. STAGP: Spatio-Temporal adaptive graph pooling network for pedestrian trajectory prediction [C]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023.
- [20] ZHONG R H, HE L, WANG H W, et al. Attention-Guided huber loss for head pose estimation based on improved capsule network[J]. *Entropy*, 2023, 25(7): 1024.

作者简介

宁子豪,硕士研究生,主要研究方向为移动机器人人机共融导航方法。

E-mail: xju_ningo@163.com

何丽(通信作者),硕士,博士生导师,副教授,主要研究方向为移动机器人共融导航与智能控制技术、智能控制方法、深度强化学习等。

E-mail: xju_heli@163.com