

## 基于改进弹簧模型的移动机器人柔顺跟随行人方法

姚瀚晨<sup>1</sup>, 彭建伟<sup>1,2</sup>, 戴厚德<sup>1,2</sup>, 林名强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海西研究院泉州装备制造研究所, 福建 晋江 362216; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对人机共融环境下的跟随型自动搬运机器人, 为了解决被跟随目标突发性运动造成机器人失灵的难题, 提出了一种基于改进弹簧模型的移动机器人柔顺跟随方法。给被跟随目标的腿部和障碍物添加虚拟弹簧, 完成了对机器人和被跟随目标之间相对位姿的闭环控制, 从而实现躲避障碍物和自然交互任务。特别地, 通过给虚拟弹簧添加动态阻尼系数, 实现了移动机器人跟随目标运动的实时性和柔顺性。通过 Simulink 仿真对比移动机器人对被跟随目标的柔顺跟随轨迹, 实现对改进弹簧模型的参数优化。采用自主开发的两轮差速移动机器人和 Vicon 光学运动捕捉系统, 在被跟随目标做无规律、长距离运动的条件下, 验证了该移动机器人跟随轨迹的平滑性和柔顺性。

**关键词:** 人机共融; 人机交互; 行人跟随; 虚拟弹簧; 柔顺控制

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2021)-06-0684-10

## A Compliant Human Following Method for Mobile Robot Based on an Improved Spring Model

YAO Hanchen<sup>1</sup>, PENG Jianwei<sup>1,2</sup>, DAI Houde<sup>1,2</sup>, LIN Mingqiang<sup>1</sup>

(1. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Jinjiang 362216, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For the automated guided vehicle with human-following function in human-machine integration environment, a compliant following method of mobile robot based on an improved spring model is proposed to solve the problem of robot malfunction caused by abrupt movements of the followed target. The closed-loop control of the relative posture between the mobile robot and the followed target is performed by adding virtual springs to the legs of the followed target and obstacles to accomplish obstacle avoidance and natural interaction tasks. In particular, dynamic damping coefficients are added to the virtual spring to make the mobile robot follow the human target compliantly in real time. In Simulink simulation, the compliant following trajectory of the mobile robot is compared with the dynamic motion of the target, and thus the optimal parameters of the spring model are obtained. A self-developed two-wheeled differential mobile robot and an optical motion capture system are utilized to verify the smoothness and flexibility of the mobile robot trajectory when the followed human target performs irregular and long-distance motion.

**Keywords:** human-machine integration; human-machine interaction; human following; virtual spring; compliant control

## 1 引言 (Introduction)

下一代机器人的核心特点是人机共融<sup>[1]</sup>, 即机器人与人能在同一自然空间里紧密协调工作和自然交互, 机器人能自主地提高运动性能并有极高的安全性能。随着自主导航和人机交互<sup>[2]</sup>等先进技术与策略的应用, 机器人已经进入智能制造物流环节和社会家庭生活的各个方面; 但受限于人机协作和交互能力不足等特征, 在小批量仓储分拣和物流转运等环节还需要工人完成低效率重复劳动, 例如药店和超市货柜上过期商品的更换和新货的补充。机器

人跟随行人目标是一种典型的人机交互方式, 随着人口老龄化的加剧, 在工厂搬运、医院看护、餐饮服务、学校助教、家庭娱乐、农业和军事等场景对这种交互方式的需求越来越多<sup>[3-5]</sup>。

目前机器人跟随行人目标的控制方法多种多样, Jung 等<sup>[6]</sup> 使用比例控制模型, 实现了达到人类跑步速度的室外跟随, 缺点是随着时间的增加, 稳态误差会保留和累积, 比例控制器会崩溃; 马旭东等<sup>[7]</sup> 使用 PID (比例—积分—微分) 控制模型, 实现了控制机器人的速度和角速度跟随目标, 缺点是误差积分反馈使得机器人信号产生振荡; Tanaka

等<sup>[8]</sup>使用模糊控制模型, 实现了多个机器人的共享控制跟随, 缺点是跟随精度较低和鲁棒性较差。这些方法的美中不足之处在于, 要求跟随目标平滑移动和线性可估计<sup>[9]</sup>, 使用传统控制方法的机器人跟随轨迹是剧烈抖动的。

虚拟弹簧模型对跟随目标运动具有鲁棒性好和自适应性强的特点, 被广泛用于人机交互运动学模型。Nikoobin 等<sup>[10]</sup>将虚拟弹簧用于机器人点对点运动控制, 实现了机器人被动平衡, 没有考虑到跟随方法的闭环控制; 潘振华等<sup>[11]</sup>将虚拟弹簧用于多机器人编队跟随, 克服了局部不可达难题<sup>[12]</sup>和导航死区<sup>[13]</sup>问题, 其跟随目标是平滑移动的机器人, 不适用于跟随目标是行人的情况; Morioka 等<sup>[14]</sup>使用虚拟弹簧模型基于多个相机在分布式智能网络下实现了机器人跟随行人, 由于没有考虑安全距离, 机器人有碰撞跟随目标的危险; 阮晓钢等<sup>[15]</sup>使用虚拟弹簧模型实现了两轮机器人的柔顺控制, 该方法使用静态阻尼系数, 导致机器人运动的跟随效果较差, 不足以应对被跟随目标的突然转弯等情况。然而, 当被跟随目标有急停、变速、急转弯等突发动作时, 机器人有失灵失控的风险。

为了解决这一难题, 本文提出了一种改进的弹簧模型, 其区别于传统的虚拟弹簧模型之处在于:首先, 在虚拟弹簧中添加了动态的阻尼系数, 阻尼系数与虚拟弹簧的物理距离负相关, 实现了机器人跟随运动的柔顺性;其次, 在虚拟弹簧中添加了安全距离, 避免了机器人减速不及时碰撞被跟随目标;最后, 改进的虚拟弹簧模型考虑了环境中的障碍物, 通过障碍物和机器人之间的虚拟弹簧实现避障。为了更好地描述机器人和跟随目标之间的动态关系, 将改进的弹簧模型引入到移动机器人的运动学和动力学模型。通过仿真实验, 观察和对比移动机器人对动态目标的柔顺跟随轨迹, 以实现改进弹簧模型的参数优化。通过自主开发的两轮差速移动机器人和 Vicon 光学运动捕捉系统, 在被跟随人体目标做无规律和长距离运动的条件下, 验证了移动机器人跟随轨迹的柔顺性。

## 2 改进的虚拟弹簧模型 (The improved virtual spring model)

在跟随机器人的实际应用场景中, 机器人跟随行人的噪声信息往往比较复杂<sup>[16-19]</sup>。人机共融环境下, 机器人跟随行人的场景主要包含: 被跟随目标、机器人、动态障碍物和静态障碍物。被跟随目标会受到环境中障碍物的影响, 其运动速度和方向

容易产生突然变化, 这给跟随机器人的运动控制提出了巨大的挑战<sup>[20-22]</sup>。

为解决跟随机器人运行环境复杂的难题, 本方法采用改进的虚拟弹簧模型。该模型考虑了机器人与被跟随目标、障碍物三者之间虚拟弹簧的特性, 使得机器人能在躲避障碍物的前提下, 实时和柔顺地跟随目标行人。图 1 对改进虚拟弹簧模型中机器人  $r$  和被跟随目标  $h$  之间的虚拟弹簧、机器人  $r$  和障碍物  $o$  之间的虚拟弹簧进行了受力分析。

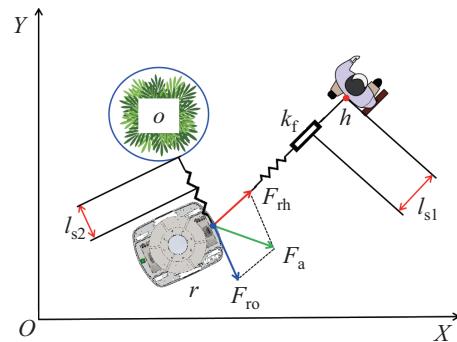


图 1 移动机器人跟随目标和避障时的受力分析

Fig.1 Force analysis on a mobile robot in human-following and obstacle-avoidance task

如图 1 所示, 机器人、被跟随目标和障碍物都受到了改进虚拟弹簧的影响。机器人在跟随目标时所受到的弹力  $F_{rh}$  与两者距离成正比, 方向指向被跟随目标的方向。当机器人靠近障碍物时, 障碍物产生的斥力  $F_{ro}$  与两者距离成反比, 方向指向远离障碍物的方向。当机器人在跟随运动中遇到障碍物时, 机器人将向合力  $F_a$  的方向驶去。

区别于传统的虚拟弹簧模型, 改进的虚拟弹簧模型考虑了机器人和障碍物之间的关系, 添加了机器人和被跟随目标之间的安全距离  $l_{s1}$ 、机器人和障碍物之间的安全距离  $l_{s2}$  和动态阻尼系数  $k_f$ 。

### 2.1 移动机器人柔顺跟随目标

如图 2 所示, 在跟随运动的加速、减速和跟踪阶段, 机器人  $r$  和被跟随目标  $h$  之间弹簧的松紧状态有不同变化。在目标加速阶段, 机器人和目标之间的距离增加, 虚拟弹簧为拉伸状态; 在目标减速阶段, 机器人和目标之间的距离减小, 虚拟弹簧为压缩状态; 在目标跟踪阶段, 机器人和目标之间的距离较为稳定, 虚拟弹簧为松弛状态。

机器人和目标之间的弹簧松紧状态  $s_{rh}$  为

$$s_{rh} = \begin{cases} 1, & l_0 < l_{rh} \\ 0, & l_0 = l_{rh} \\ -1, & l_0 > l_{rh} \end{cases} \quad (1)$$

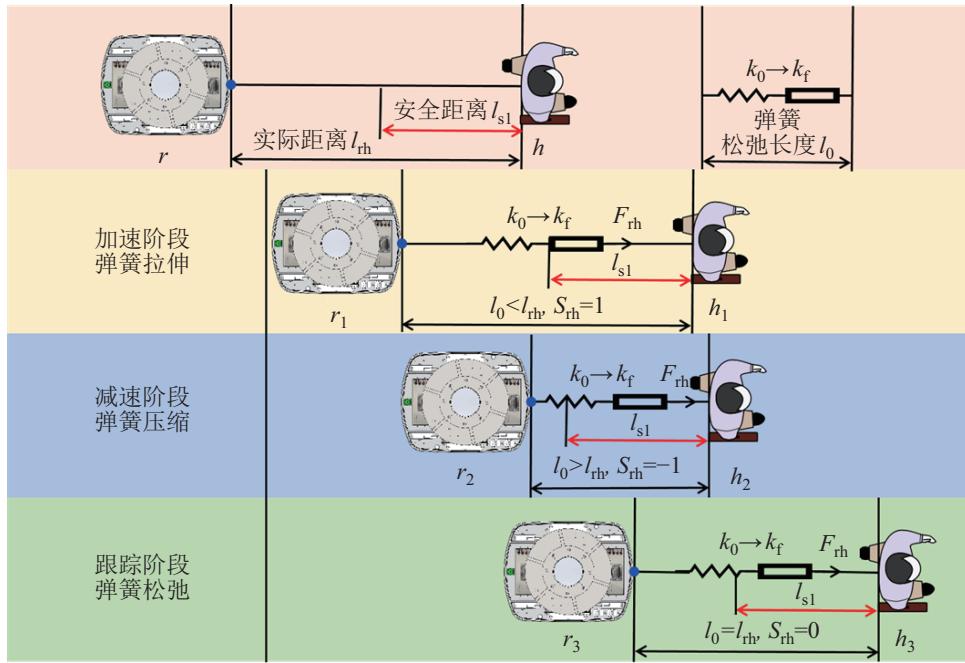


图 2 机器人在不同跟随阶段下的弹簧松紧状态

Fig.2 Spring tightness at different stages when the robot following a human

式中,  $l_0$  为虚拟弹簧的松弛长度,  $l_{rh}$  为机器人  $r$  和目标  $h$  之间的物理距离.

为了防止机器人碰撞到被跟随目标, 在机器人和目标之间设置安全距离  $l_{s1}$ , 虚拟弹簧的弹力  $F_{rh}$  表示为

$$F_{rh} = \begin{cases} s_{rh} k_f |l_0 - l_{rh}|, & l_0 \geq l_{rh} \\ s_{rh} k_f |l_0 - l_{rh}| \frac{1}{(l_{rh} - l_{s1})^2}, & l_{s1} < l_0 < l_{rh} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $s_{rh}$  为机器人  $r$  和被跟随目标  $h$  之间的弹簧松紧状态,  $k_f$  为虚拟弹簧的动态阻尼系数,  $l_0$  为虚拟弹簧松弛时的长度,  $l_{rh}$  为机器人  $r$  和被跟随目标  $h$  之间的物理距离. 虚拟弹簧的动态阻尼系数  $k_f$  为一个与  $l_{rh}$  负相关的变量. 即机器人与目标的距离越近, 虚拟弹簧的动态阻尼系数越大.

$$k_f = \frac{1}{l_{rh}^2} k_0 \quad (3)$$

式中,  $k_0$  为虚拟弹簧的弹性系数. 此时, 机器人  $r$  和目标  $h$  之间的弹簧夹角  $\theta_{rh}$  表示为

$$\theta_{rh} = \begin{cases} \alpha \sin \frac{y_r - y_h}{\sqrt{(x_r - x_h)^2 + (y_r - y_h)^2}}, & y_r \geq y_h \\ 2\pi - \alpha \sin \frac{y_r - y_h}{\sqrt{(x_r - x_h)^2 + (y_r - y_h)^2}}, & y_r < y_h \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $(x_r, y_r)$  为机器人的坐标位置,  $(x_h, y_h)$  为目标的坐标位置.

## 2.2 移动机器人躲避障碍物

障碍物给机器人施加的斥力  $F_{ro}$  表示为

$$F_{ro} = \begin{cases} k_r |l_0 - l_{ro}|, & l_{ro} \leq l_{s2} \\ 0, & l_{ro} > l_{s2} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $k_r$  为障碍物虚拟弹簧的弹性系数,  $l_0$  为虚拟弹簧松弛时的长度,  $l_{ro}$  为机器人和障碍物之间的物理距离,  $l_{s2}$  为机器人和障碍物之间的安全距离.

机器人在跟随运动下躲避障碍物时, 受到的合力  $F_a$  表示为

$$F_a = F_{rh} + \sum_{i=1}^n i F_{ro} \quad (6)$$

式中,  $n$  为影响机器人的障碍物的虚拟弹簧数量.

## 3 柔顺跟随闭环控制 (Closed-loop control for compliant following)

如图 3 所示, 通过输入机器人位姿  $(x_r, y_r, \theta_r)$  和被跟随目标位姿  $(x_h, y_h, \theta_h)$ , 得到两者之间的轨迹误差. 改进虚拟弹簧模型通过对机器人运动学模型和动力学模型进行建模分析, 控制机器人在跟随状态下速度  $v$  和角速度  $\omega$  的变化, 从而实现移动机器人在柔顺跟随过程中的闭环控制. 其中, 机器人位姿和目标位姿是实时更新的.

### 3.1 移动机器人跟随运动学模型

将移动机器人视为一个在 2 维平面上运动的刚体, 建立了世界坐标系  $X_w OY_w$  和机器人坐标系

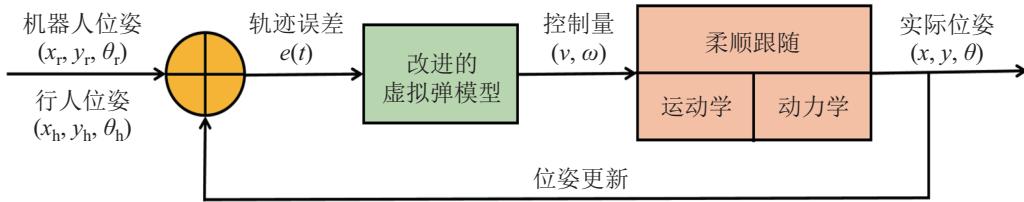


图 3 移动机器人的闭环控制框图

Fig.3 Closed-loop control diagram of the mobile robot for compliant following

$X_R P_{RW} Y_R$ . 如图 4 所示, 通过控制机器人左、右轮速度, 实现在直线行驶和转弯行驶状态下对机器人线速度和角速度的运动学控制.

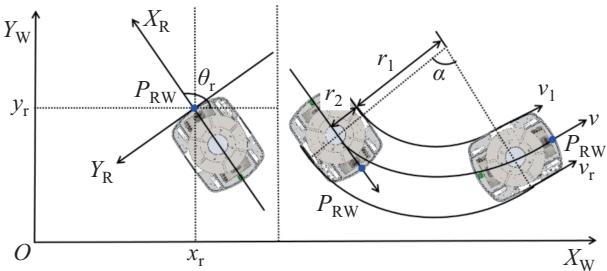


图 4 机器人直线行驶(左)和机器人转弯行驶(右)

Fig.4 Robot motion control: running straightly (left) and turning (right)

在图 4 的左图中, 选取机器人底盘上的某一点  $P_{RW}$  为机器人位置坐标参考点, 机器人的前进方向为机器人坐标系中  $X_R$  的正方向. 其中, 机器人位置坐标参考点  $P_{RW}$  由世界坐标系中的坐标  $(x_r, y_r)$  决定, 机器人姿态角  $\theta_r$  由世界坐标系和机器人坐标系之间的角度差决定. 此时, 机器人的位置和姿态描述为  $\mathbf{P}_{RW} = (x_r, y_r, \theta_r)^T$ .

机器人的运动学分析可以分为直线行驶和转弯行驶 2 种情况. 如图 4 中的左图所示, 当机器人直线行驶时, 线速度为  $v = (v_l + v_r)/2$ , 角速度为  $\omega = 0$ . 如图 4 中的右图所示, 当机器人转弯行驶时, 线速度为  $v = (v_l + v_r)/2$ , 角速度为  $\omega = (v_r - v_l)/2r_2$ . 其中,  $r_2$  为图 5 中机器人轮胎的端点到机器人中心的车轮轴间距距离.

### 3.2 移动机器人跟随任务的动力学模型

如图 5 所示, 将改进虚拟弹簧模型引入机器人动力学模型, 考虑了机器人和目标之间、机器人和障碍物之间存在虚拟弹簧时的运动情况. 根据机器人位姿、目标位姿和障碍物位姿的动态关系调整机器人的输入速度, 使得机器人能柔顺跟随行人.

机器人、目标和障碍物在世界坐标系下的位姿分别为  $\mathbf{P}_{RW} = (x_r, y_r, \theta_r)^T$ ,  $\mathbf{P}_{OW} = (x_o, y_o, \theta_o)^T$  和  $\mathbf{P}_{HW} = (x_h, y_h, \theta_h)^T$ . 此时, 机器人和目标的运动学

关系可以描述为

$$\begin{cases} l_{rh} = \sqrt{(x_r - x_h)^2 + (y_r - y_h)^2} \\ l_{ro} = \sqrt{(x_r - x_o)^2 + (y_r - y_o)^2} \\ \theta_h = \arctan \frac{y_h - y_r}{x_h - x_r} \\ \theta_o = \arctan \frac{y_o - y_r}{x_o - x_r} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $l_{rh}$  为机器人位置参考点  $P_{RW}$  与目标位置参考点  $P_{HW}$  之间的距离,  $l_{ro}$  为机器人位置参考点  $P_{RW}$  与障碍物位置参考点  $P_{OW}$  之间的距离,  $\theta_h$  为世界坐标系下目标的姿态角(紫色),  $\theta_o$  为世界坐标系下机器人到障碍物的姿态角(蓝色),  $\theta_r$  为机器人的姿态角(绿色).

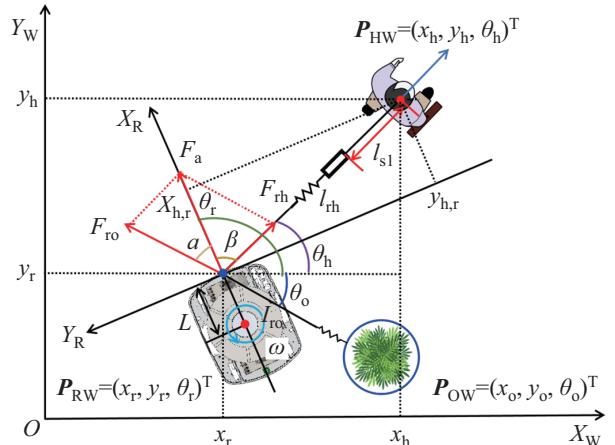


图 5 基于改进弹簧模型的动力学分析

Fig.5 Kinetic analysis based on the improved spring model

在机器人柔顺跟随过程中, 将机器人受到的力在机器人坐标系下拆分为  $F_{XR}$  和  $F_{YR}$ . 根据牛顿第二定律, 得到  $X_R$  轴方向上的力学表达式:

$$\begin{cases} F_{XR} = ma = m\dot{v} \\ m\ddot{v} = F_{ro} \cos \alpha + F_{rh} \cos \beta \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $F_{XR}$  为机器人在机器人坐标系  $X$  轴上受到的分力;  $m$  为机器人的质量, 单位为 kg;  $\alpha$  和  $\beta$  为图 6 所示的夹角.

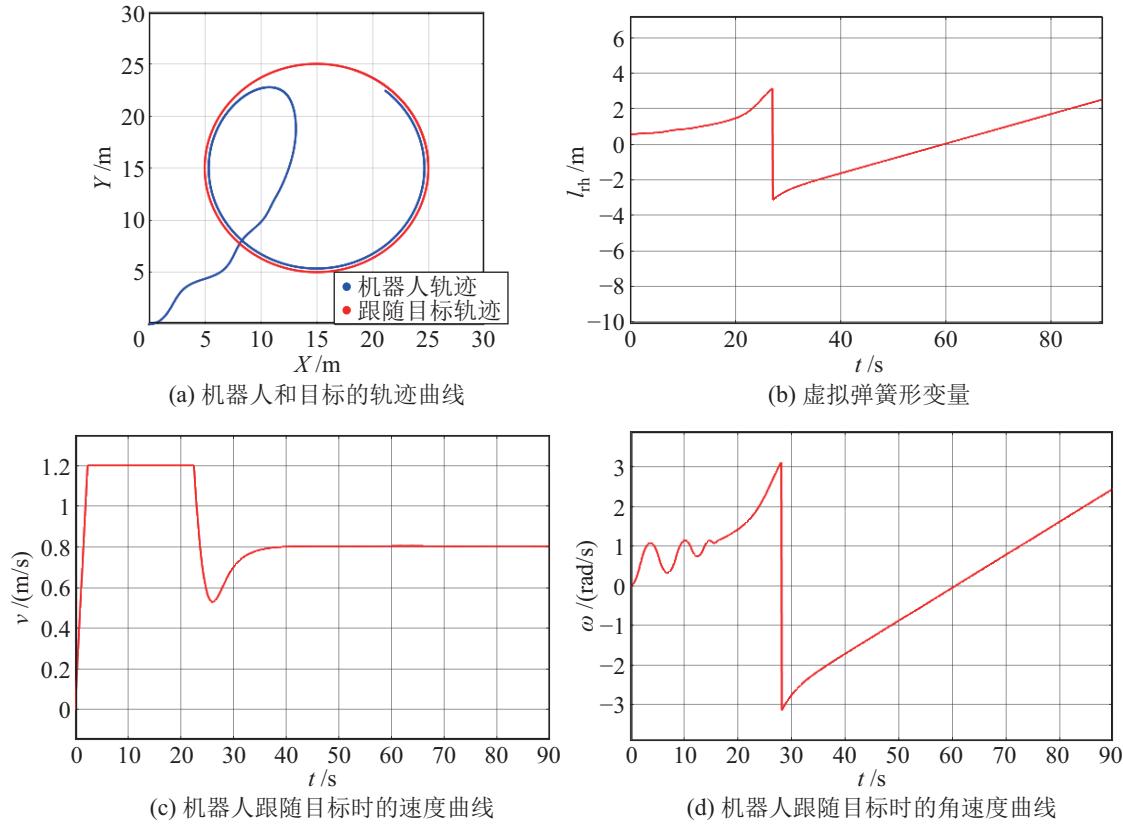


图 6 动态目标绕圆行走时机器人的柔顺跟随轨迹

Fig.6 Compliant following trajectory of the robot when the target moving around a circle

根据刚体的转动定律, 得到  $Y_R$  轴方向上的动力学表达式:

$$\begin{cases} J\dot{\omega} = F_{YR} \cdot L \\ J\ddot{\omega} = (F_{ro} \sin \alpha - F_{rh} \sin \beta)L \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $F_{YR}$  为机器人在机器人坐标系  $Y$  轴上受到的分力;  $J$  为机器人的转动惯量, 单位为  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ;  $L$  为机器人上虚拟弹簧的端点到机器人旋转中心的距离;  $\alpha$  和  $\beta$  为图 6 所示的夹角.

综合式(8)(9), 得到基于改进弹簧模型的机器人柔顺跟随动力学模型:

$$\begin{cases} \ddot{v} = \frac{F_{ro} \cos \alpha + F_{rh} \cos \beta}{m} \\ \ddot{\omega} = \frac{(F_{ro} \sin \alpha - F_{rh} \sin \beta)L}{J} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\ddot{v}$  为机器人柔顺跟随目标时的线加速度,  $\ddot{\omega}$  为机器人柔顺跟随目标时的角加速度.

## 4 实验结果与分析 (Experimental results and analysis)

### 4.1 仿真实验

使用 2020a 版 Matlab 软件中的 Simulink 工具搭建了基于改进弹簧模型的可视化仿真模型. 通过分

析机器人轨迹曲线在仿真实验中的特性, 优化相应的参数, 将优化后的参数用于实际的测验中, 从而使得机器人实现更好的柔顺跟随效果.

仿真中动态目标的运动分为绕圆行走和无序行走 2 种情况, 参数设置如表 1 和表 2 所示. 其中, 当机器人跟随绕圆行走的动态目标时, 目标行人的运动轨迹见参数方程(11).

$$\begin{cases} x = 15 + 10 \cos \frac{i}{120} \\ y = 15 + 10 \sin \frac{i}{120} \end{cases} \quad (11)$$

表 1 机器人和被跟随目标的基本参数设置

Tab.1 Basic parameters of the mobile robot and the followed target

基本参数	参数大小
虚拟弹簧安全距离 $l_{s1}$ 和 $l_{s2}$ /m	1
机器人质量 $m$ /kg	400
机器人转动惯量 $J$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	1000
弹簧力方向上的阻尼系数 $c_1$	6000
弹簧力垂直方向上的阻尼系数 $c_2$	6000
弹簧力方向上的弹力系数 $k_1$	2000
弹簧力垂直方向上的弹力系数 $k_2$	2000

表 2 机器人和被跟随目标的位姿参数设置

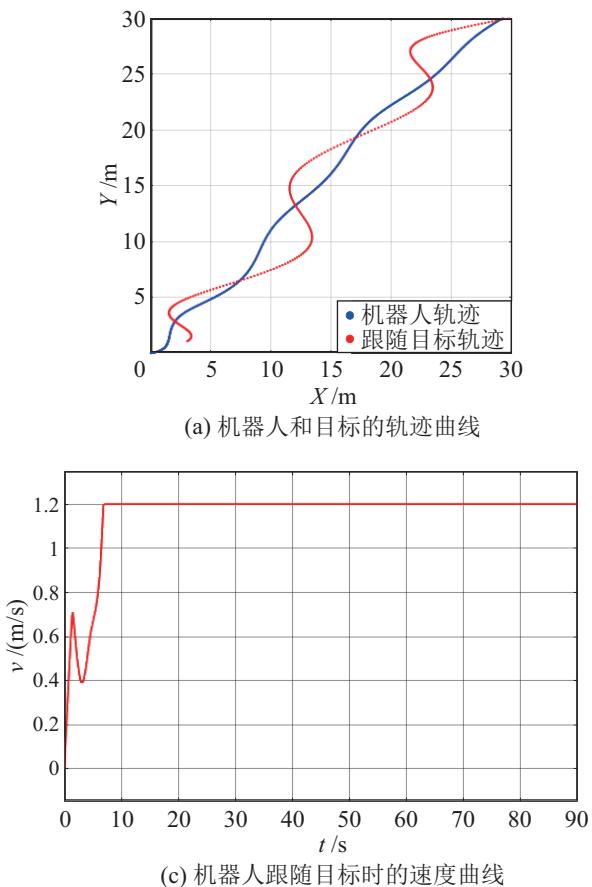
Tab.2 Pose parameters of the mobile robot and the followed target

仿真实验 跟随目标 设定	机器人 初始位姿 ( $x_r, y_r, \theta_r$ )	跟随目标 初始位姿 ( $x_h, y_h, \theta_h$ )
绕圆行走动态目标	(0 m, 0 m, 0°)	(25.0 m, 15.0 m, 0°)
无序行走动态目标	(0 m, 0 m, 0°)	(3.0 m, 1.0 m, 0°)

当机器人跟随无序行走的动态目标时, 目标行人的运动轨迹见参数方程(12).

$$\begin{cases} x = 3 \cos \left( -2\pi \cdot \frac{i}{100} + 2\pi \right) + \frac{i}{10} \\ y = 1 + 2 \sin \left( 2\pi \cdot \frac{i}{300} + \pi \right) + \frac{i}{10} \end{cases} \quad (12)$$

如图 6 所示, 当动态目标绕圆行走时, 机器人先加速追赶动态目标 (弹簧特性大于阻尼特性), 然后缓慢靠近 (阻抗特性大于弹簧特性), 最终以内切圆的姿态柔顺跟随目标. 在图 6(c) 机器人跟随目标时的速度曲线中, 当被跟随目标大幅度转变方向时, 机器人的速度曲线是缓慢下落、缓慢回升的, 这一过程体现了改进弹簧模型的柔顺性.



如图 7 所示, 当动态目标无序行走时, 机器人加速追赶动态目标 (弹簧特性大于阻尼特性); 当动态目标突发性地急转弯时, 机器人能够实时调整位姿. 在图 7(c) 机器人跟随目标时的速度曲线中, 即使被跟随目标不断地变换姿态, 机器人仍然能够保持一段时间的匀速跟随, 这一过程体现了改进弹簧模型的柔顺性. 综上所述, 在仿真实验中机器人能够始终柔顺地调整位置和姿态, 跟随轨迹较为平滑.

#### 4.2 柔顺跟随实验

在安装有 Vicon 光学运动捕捉系统的房间中开展了柔顺跟随实验, 实现和记录了机器人柔顺跟随目标. 如图 8 所示, 实验设备包含 Vicon 光学运动捕捉系统、两轮差速移动机器人和光学标记物. 其中, Vicon 运动捕捉传感器 (红色区域) 使用 6 个运动捕捉相机, 能够在全局坐标系下对光学标记物的位姿进行实时捕捉和记录. 两轮差速移动机器人 (黄色区域) 搭载了 2 个差速动力轮、1 个交流伺服电机、1 个 NVIDIA Jetson TX2 控制主板, 通过 ROS 操作系统实现对机器人的操作和控制. 光学标记物 (蓝色区域) 包含 Vicon 标定杆和反光球. 如

图 7 动态目标无序行走时机器人的柔顺跟随轨迹

Fig.7 Compliant following trajectory of the robot when the target moving disorderly

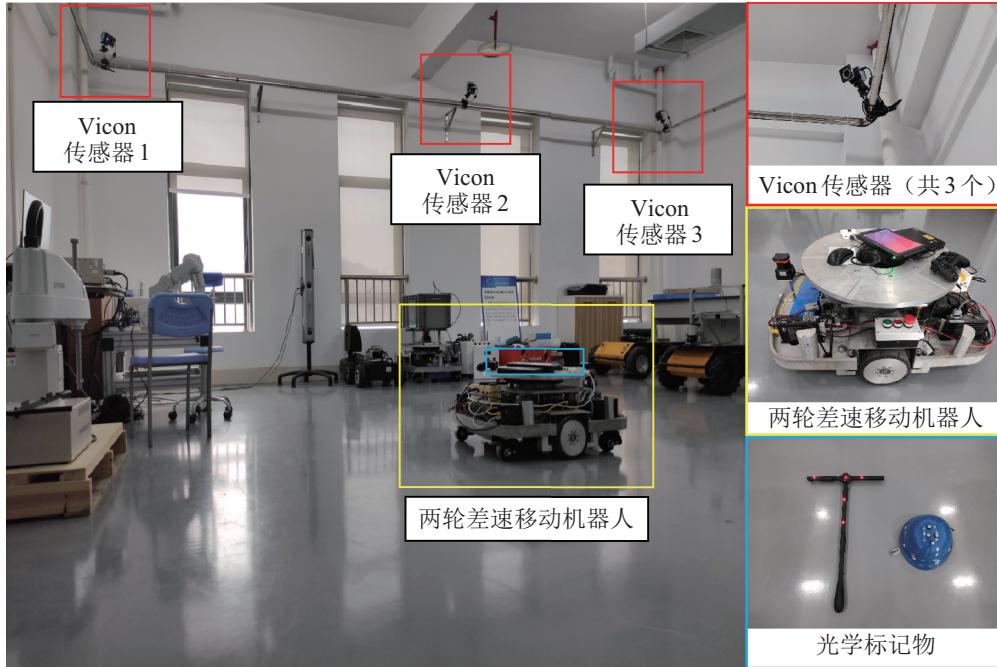


图 8 柔顺跟随实验的设置  
Fig.8 Setup for the compliant following experiment

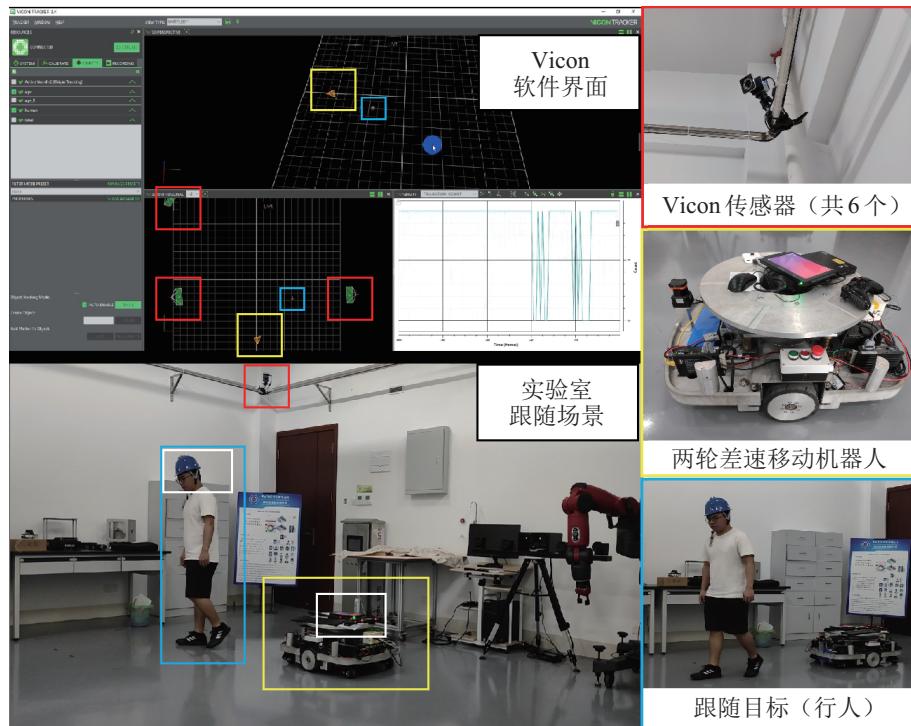


图 9 Vicon 系统对目标和机器人的位姿实时监控  
Fig.9 Real-time monitoring of the position and posture of the followed target and robot by Vicon system

图 9 所示，在 Vicon 软件下同时捕捉到了机器人和目标的实时位姿。其中，红色区域为 Vicon 运动捕捉传感器的位姿，黄色区域为两轮差速移动机器人的位姿，蓝色区域为目标位姿，白色区域为光学标记物。柔顺跟随实验分为目标走圆圈轨迹、目标无序行走、机器人躲避障碍物和目标无序长距离行走

几种情况。

柔顺跟随实验的基本参数设置如表 3 所示。其中，Vicon 传感器的相机镜头分辨率为 130 万像素，频率为 120 Hz。机器人和目标的最大线速度分别为 2.2 m/s、1.2 m/s，因此 Vicon 传感器的配置适用于高速移动的目标。

表 3 机器人和 Vicon 传感器的基本参数

Tab.3 Basic parameters of the mobile robot and the Vicon sensor

	基本参数	参数大小
两轮差速机器人	电机额定转速 $n$ /(r/min)	3000
	电机额定力矩 $T$ /(N·m)	0.64
	电机额定功率 $P$ /W	200
	机器人最大线速度 $v$ /(m/s)	2.2
Vicon 传感器	机器人最大角速度 $\omega$ /(rad/s)	4.8
	相机尺寸 $H \times W \times D$ /mm $\times$ mm $\times$ mm	83 $\times$ 80 $\times$ 135
	分辨率/像素	1280 $\times$ 1024
	最大帧速 /Hz	240
	相机延迟 /ms	4.2

#### 4.2.1 目标走圆圈轨迹

如图 10(a) 所示, 实验验证了圆圈轨迹下改进弹簧模型的柔顺性。目标走了一段圆圈轨迹(目标轨迹的方差为  $6.25 \text{ m}^2$ ), 机器人实时跟随(机器人轨迹的方差为  $0.44 \text{ m}^2$ ), 得到了机器人柔顺跟随行人轨迹的 2 维视图和 3 维视图。其中, 由于目标在行走时身体重心变化, 其轨迹呈现左右抖动。

#### 4.2.2 目标无规律靠近机器人

如图 10(b) 所示, 通过实验验证目标突然靠近机器人时机器人能否柔顺跟随目标。目标走了一段无规律的轨迹靠近机器人(目标轨迹的方差为  $11.56 \text{ m}^2$ ), 机器人实时跟随(机器人轨迹的方差为  $0.32 \text{ m}^2$ ), 得到了机器人柔顺跟随行人轨迹的 2 维视图和 3 维视图。随着目标的靠近, 机器人靠近目标, 跟随轨迹较为平滑。

#### 4.2.3 机器人躲避障碍物

如图 10(c) 所示, 实验验证了机器人能否躲避障碍物并实时跟随。实验中  $(1.5, -0.5, 0)$  的位置布置了障碍物, 目标走了一段无序的轨迹, 最后目标远离机器人, 得到了机器人柔顺跟随轨迹的 2 维视图和 3 维视图。其中, 目标无序地走动(目标轨迹的方差为  $14.06 \text{ m}^2$ ), 随着目标的远离, 机器人加速追赶目标, 跟随轨迹较为平滑(机器人轨迹的方差为  $0.56 \text{ m}^2$ )。

#### 4.2.4 目标无规律长距离行走

如图 10(d) 所示, 实验验证了长距离行走场景下改进弹簧模型的柔顺性。目标走了一段数据长度为 8400 个点、时长为 342 s 的长距离轨迹, 机器人没有出现失灵, 跟随轨迹较为平滑, 得到了机器人柔顺跟随轨迹的 2 维视图和 3 维视图。在目标

无规律长距离行走的轨迹下, 目标轨迹的方差为  $25.37 \text{ m}^2$ , 机器人轨迹的方差为  $0.84 \text{ m}^2$ , 目标和机器人之间的均方根误差为  $1.69 \text{ m}^2$ 。

#### 4.3 评价指标

为了量化分析移动机器人的跟随柔顺性, 本文使用方差和均方根误差作为评价指标, 评价结果如表 4 所示。其中, 方差 (VAR) 描述了样本中每个变量与总体均值间的离散程度, 反映了目标轨迹和机器人轨迹的样本数据的波动程度; 均方根误差 (RMSE) 描述了观测值与真实值之间的误差, 反映了被跟随目标和机器人之间的跟随情况。方差和均方根误差的数学表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{VAR}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \mu)^2 \\ E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\lambda_h - \lambda_r)^2} \end{array} \right. \quad (13)$$

式中,  $N$  为样本数量;  $\mu$  为样本数量的均值;  $\lambda$  为机器人和目标位置相关的参数, 其中各参数的计算包括  $\lambda = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $\lambda_h$  为与被跟随目标位置相关的参数, 其中  $\lambda_h = \sqrt{x_h^2 + y_h^2}$ ;  $\lambda_r$  为与机器人位置相关的参数, 其中  $\lambda_r = \sqrt{x_r^2 + y_r^2}$ 。在式 (13) 中, 方差越大代表轨迹曲线波动越大, 均方根误差越小代表跟随运动的柔顺性越好。

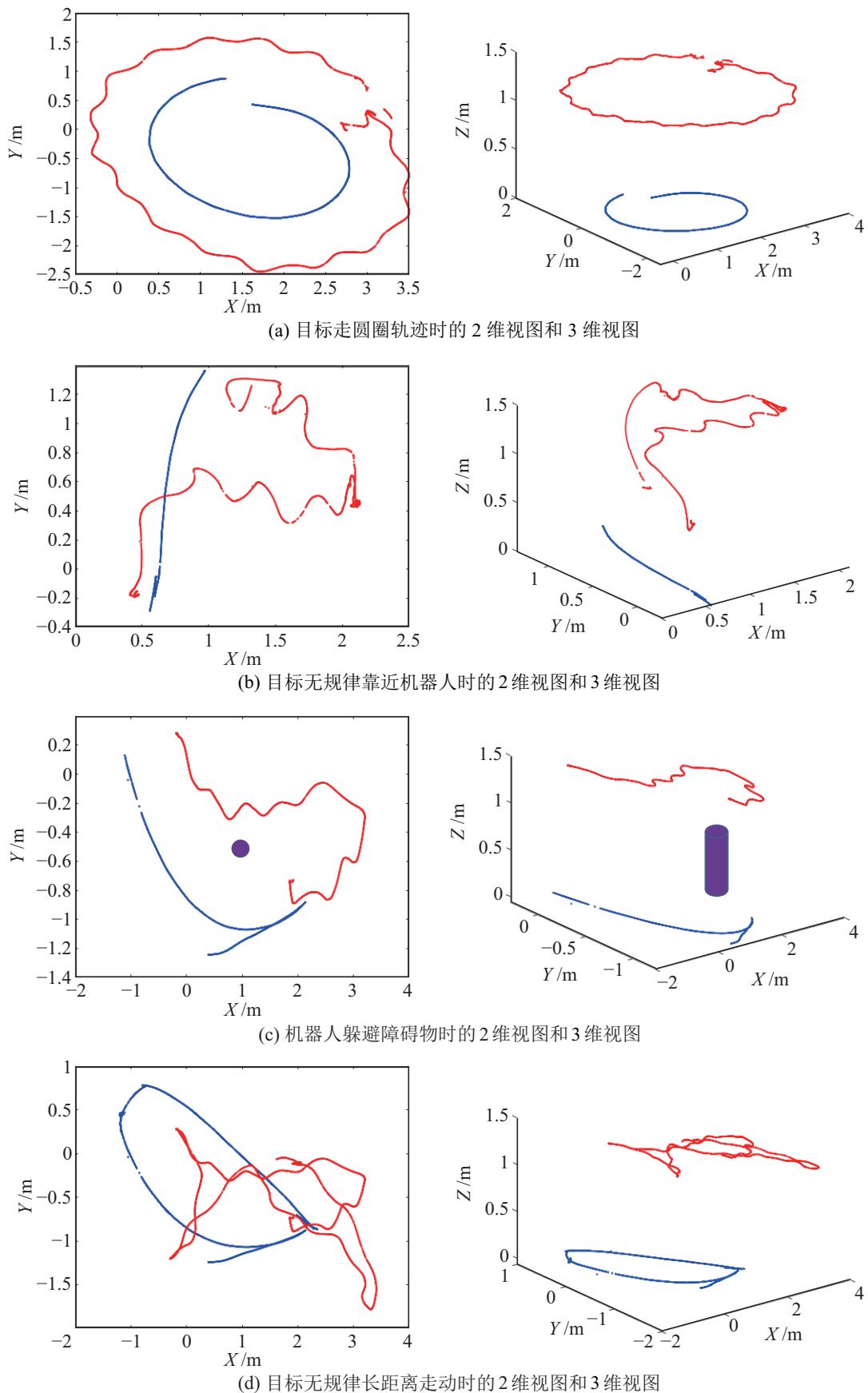
表 4 机器人柔顺跟随的评价指标

Tab.4 Evaluation indexes for the robot compliant following

轨迹曲线	方差 / $\text{m}^2$		均方根误差 /m
	目标	机器人	
图 10(a), 目标走圆圈轨迹	6.25	0.44	1.52
图 10(b), 目标靠近机器人	11.56	0.32	1.41
图 10(c), 机器人躲避障碍物	14.06	0.56	1.72
图 10(d), 目标长距离走动	25.37	0.84	1.69

#### 5 结论 (Conclusion)

本文针对两轮差速移动机器人, 提出一种基于改进弹簧模型的移动机器人柔顺跟随方法。本方法旨在解决被跟随目标执行不可预测的突发运动(急停、变速、急转弯等突发情况)所造成的传统机器人跟随方法失效、甚至机器人失灵碰撞等危险。进而, 在目标无规律运动场景下实现了机器人对行人的柔顺跟随。为了验证本方法的柔顺性, 基于 Simulink 工具进行仿真优化并在 Vicon 光学运动捕捉系统环境下进行验证实验。在被跟随目标做圆圈走动、无规律走动、长距离走动等实验场景下, 移



注：红色轨迹代表跟随目标，蓝色轨迹代表机器人，紫色区域为设置在  $(-1, -0.5)$  的障碍物

图 10 真实场景下行人目标的多种轨迹跟随实验

Fig.10 Human-following experiments along multiple trajectories in actual scene

动机器人的跟随轨迹较为柔顺平滑。其中, 当目标做无规律长距离走动时(被跟随目标的轨迹方差为 $25.37\text{ m}^2$ ), 机器人表现出较好的跟随柔顺性(机器人轨迹的方差为 $0.84\text{ m}^2$ ), 完整轨迹下均方根误差为 $1.69\text{ m}$ 。

下一步, 需要考虑在多障碍物和人群密集场景下移动机器人如何实现柔顺跟随; 通过柔顺跟随与自主导航及目标跟踪功能模块相结合, 实现面向厂区物流、零售分拣等场景的应用, 进而实现在军事、农业、体育等领域的复杂环境(多静态和动态障碍物)中的应用。

## 参考文献 (References)

- [1] Song P, Yu Y Q, Zhang X P. A tutorial survey and comparison of impedance control on robotic manipulation[J]. *Robotica*, 2019, 37(5): 801-836.
- [2] Gupta M, Kumar S, Behera L, et al. A novel vision-based tracking algorithm for a human-following mobile robot[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(7): 1415-1427.
- [3] Yuan J, Zhang S M, Sun Q X, et al. Laser-based intersection-aware human following with a mobile robot in indoor environments[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(1): 354-369.
- [4] Lam C P, Chou C T, Chiang K H, Fu L C, et al. Human-centered robot navigation – Towards a harmoniously human-robot co-existing environment[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(1): 99-112.
- [5] Cheng X, Zhang Y F, Cui J S, et al. Object tracking via temporal consistency dictionary learning[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(4): 628-638.
- [6] Jung E J, Lee J H, Yi B J, et al. Development of a laser-range-finder-based human tracking and control algorithm for a marathoner service robot[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(6): 1963-1976.
- [7] Ma X D, Hu C H, Dai X Z, et al. Sensor integration for person tracking and following with mobile robot[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 3254-3259.
- [8] Tanaka K, Tanaka M, Ohtake H, et al. Shared nonlinear control in wireless-based remote stabilization: A theoretical approach[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(3): 443-453.
- [9] Chi W Z, Wang J L, Meng Q H. A gait recognition method for human following in service robots[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2018, 48(9): 1429-1440.
- [10] Nikoobin A, Moradi M, Esmaili A. Optimal spring balancing of robot manipulators in point-to-point motion[J]. *Robotica*, 2013, 31(4): 611-621.
- [11] Pan Z H, Wang D, Deng H B, et al. A virtual spring method for the multi-robot path planning and formation control[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17: 1272-1282.
- [12] Cui J S, Liu Y, Xu Y D, et al. Tracking generic human motion via fusion of low- and high-dimensional approaches[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, 43(4): 996-1002.
- [13] Chung W, Kim H, Yoo Y, et al. The detection and following of human legs through inductive approaches for a mobile robot with a single laser range finder[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(8): 3156-3166.
- [14] Morioka K, Lee J H, Hashimoto H. Human-following mobile robot in a distributed intelligent sensor network[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(1): 229-237.
- [15] 阮晓钢, 赵建伟. 基于 Hopfield 网络的柔性两轮自平衡机器人控制[J]. 机器人, 2010, 32(3): 405-413.  
Ruan X G, Zhao J W. Flexible two-wheeled self-balancing robot control based on Hopfield neural network[J]. Robot, 2010, 32(3): 405-413.
- [16] 文忠, 钱晋武, 沈林勇, 等. 基于阻抗控制的步行康复训练机器人的轨迹自适应[J]. 机器人, 2011, 33(2): 142-149.  
Wen Z, Qian J W, Shen L Y, et al. Trajectory adaptation for impedance control based walking rehabilitation training robot[J]. Robot, 2011, 33(2): 142-149.
- [17] 谢德胜, 徐友春, 万剑, 等. 基于 RTK-GPS 的轮式移动机器人轨迹跟随控制[J]. 机器人, 2017, 39(2): 221-229.  
Xie D S, Xu Y C, Wan J, et al. Trajectory tracking control of wheeled mobile robots based on RTK-GPS[J]. Robot, 2017, 39(2): 221-229.
- [18] 杨丽, 曹志强, 张文文, 等. 一种基于局部感知的多机器人动态跟随方法[J]. 自动化学报, 2010, 36(1): 101-106.  
Yang L, Cao Z Q, Zhang W W, et al. A multi-robot dynamic following approach based on local sensing[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(1): 101-106.
- [19] 郭晏, 宋爱国, 包加桐, 等. 基于差分进化支持向量机的移动机器人可通过度预测[J]. 机器人, 2011, 33(3): 257-264,272.  
Guo Y, Song A G, Bao J T, et al. Mobile robot traversability prediction based on differential evolution support vector machine[J]. Robot, 2011, 33(3): 257-264,272.
- [20] 孙月, 刘景泰. 基于 RGB-D 传感器的室内服务机器人舒适跟随方法[J]. 机器人, 2019, 41(6): 823-833.  
Sun Y, Liu J T. RGB-D sensor based human comfortable following behavior for service robots in indoor environments[J]. Robot, 2019, 41(6): 823-833.
- [21] Katsura S, Ohnishi K. Human cooperative wheelchair for haptic interaction based on dual compliance control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(1): 221-228.
- [22] Zhang B C, Li Z G, Cao X B, et al. Output constraint transfer for kernelized correlation filter in tracking[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(4): 693-703.

## 作者简介:

姚瀚晨 (1996-), 男, 硕士生。研究领域: 移动机器人。  
彭建伟 (1997-), 男, 硕士生。研究领域: 移动机器人。  
戴厚德 (1982-), 男, 博士, 研究员。研究领域: 多模态  
传感器信息融合, 移动机器人定位导航。