

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.230163

## 基于导纳控制的社交机器人伴随与避障控制策略

廖哲霖<sup>1,2</sup>, 彭建伟<sup>2</sup>, 姚瀚晨<sup>2</sup>, 苏泽凡<sup>2</sup>, 戴厚德<sup>2</sup>

(1. 福建农林大学机电工程学院, 福建 福州 350002; 2. 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350005)

**摘要:** 目前社交机器人与目标人体并排行走(人体伴随与避障)时的运动控制策略的研究相对缺乏。为提升陪伴任务中用户的舒适度、机器人的运动柔顺度及其安全避障能力, 本文提出了一种基于导纳控制的人体伴随与避障控制策略。首先, 基于人机交互空间理论设计了交互力模型以构建人机动态交互关系, 避免机器人侵犯目标人的亲密区域以提升目标人的舒适度; 其次, 将导纳控制模型与交互力模型结合, 通过设置合理的导纳参数提升机器人运动控制的柔顺度; 最后, 引入行为动力学模型模拟人类的避障行为, 以保障人体伴随任务的安全性。此外, 提出了一组评价指标以验证伴随控制器的性能。根据仿真实验结果, 在柔顺度方面, 相较于 PID 法和虚拟弹簧模型(VSM)法, 本方法下速度变化量分别降低 69.6% 和 67.1%; 在舒适度方面, 机器人未给目标人带来不适; 在安全性方面, 本方法的避障失败率仅为 10%, 优于人工势场(APF)法和 VSM 法的 40% 和 50%。实物实验中, 机器人的柔顺度和舒适度指标均较好, 避障失败率仅为 5%, 有效实现了安全友好的人体伴随与避障控制。

**关键词:** 人机共融; 伴随; 导纳控制; 行为动力学; 社交机器人; 避障

### Admittance Control-based Human-accompanying and Obstacle-avoidance Control Strategy for Social Robot

LIAO Zhelin<sup>1,2</sup>, PENG Jianwei<sup>2</sup>, YAO Hanchen<sup>2</sup>, SU Zefan<sup>2</sup>, DAI Houde<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350005, China)

**Abstract:** Current research on the motion control strategies of the social robots walking side-by-side with a target human body (i.e. human accompanying and obstacle avoidance) is deficient. To improve the accompanying comfort level, and the motion compliance and safe obstacle-avoidance performances of the robot, a human-accompanying and obstacle-avoidance control strategy is proposed based on admittance control. Firstly, an interaction force model is designed based on the theory of human-robot interaction space, which describes the dynamic human-robot interaction relationship to prevent the robot from infringing into the companion's intimate area, thereby enhancing the comfort level of the companion. Secondly, the admittance control model is combined with the interaction force model to improve the motion compliance of the robot through optimal admittance parameters. Finally, a behavioral dynamics model is introduced to simulate the human obstacle-avoidance behavior, thereby ensuring the safety of the human-accompanying task. Additionally, a set of evaluation indexes are proposed for human-accompanying performance. The simulation results show that the robot velocity change under the proposed method is reduced by 69.6% and 67.1% respectively compared with PID (proportional-integral-derivative) and VSM (virtual spring model) methods, demonstrating its advantages in terms of compliance; in terms of comfort, the robot doesn't cause discomfort to humans; in terms of safety, the obstacle-avoidance failure rate of the proposed method is only 10%, better than the 40% and 50% of APF (artificial potential field) and VSM methods. In the physical experiment, the robot exhibits better compliance and comfort performances, and the obstacle-avoidance failure rate is only 5%. Therefore, the proposed method effectively achieves safe and friendly human accompanying and obstacle-avoidance control.

**Keywords:** human-robot coexistence; human-accompanying; admittance control; behavioral dynamics; social robot; obstacle avoidance

人机共融是新一代机器人的核心特征<sup>[1]</sup>, 对机器人与人类的自然交互能力提出了更高要求。目前国内外多数国家面临人口老龄化、劳动力成本攀

升、社会医疗资源日趋紧张等挑战, 人机共融场景下的社交机器人在老年陪护<sup>[2]</sup>、医疗护理<sup>[3]</sup>、工业生产<sup>[4]</sup>等领域具备广泛应用前景。自主跟随是陪伴

机器人系统的一项核心技术,其功能是控制机器人稳定可靠地自动跟随人体目标并执行协作任务<sup>[5]</sup>,实现人机共融环境下安全友好的交互协作。

近年来,人机跟随策略方面的研究主要关注的是后跟随策略<sup>[6]</sup>。然而,有关人类结伴行走行为的研究<sup>[7]</sup>表明,人类更希望机器人尽可能在其视野范围内运动。相较于机器人在目标人后方跟随给人类带来心理压力,机器人在目标人侧方陪伴运动是一种更为舒适、自然的跟随方式<sup>[8]</sup>。目前只有少数研究关注并实现了与人体目标并排的陪伴跟随,但效果并不理想。Manawadu等<sup>[9]</sup>提出了一种人机并排运动模型实现了机器人的陪伴跟随,但采用的比例控制算法鲁棒性较差。Yao等<sup>[10]</sup>设计了一种基于PID法的跟随策略,机器人通过转角时从后跟随模式切换到并排跟随模式以扩大机器人的视野,避免丢失被跟随目标,然而该策略只适用于特定场景。Xue等<sup>[11]</sup>提出了一种基于虚拟目标的跟随策略,该策略将被跟随目标人的位置转换到机器人正前方从而得到一个虚拟目标,但该方法无法适应目标人的运动意图临时突变引起的速度变化。此外,上述方法下人机相对位置控制主要是基于单一的位置跟踪策略,未考虑人机交互过程的柔顺性和用户在伴随任务中的舒适感受。

为实现人机共融系统,近年来有学者尝试将跟随策略集成到机器人地图导航框架中。Ferrer等<sup>[12]</sup>提出了基于社会力模型的地图导航框架,Repiso等<sup>[13]</sup>对其进行改进,使机器人能够遵守人类社交规则。Kästner等<sup>[14]</sup>采用强化学习算法,在栅格地图中通过环境和任务的语义信息训练智能体策略。然而,基于地图导航框架的方法数据量大,平台算力要求较高,系统响应速度不稳定,参数的整定也较为复杂,难以在不同机器人之间移植。

为了提升控制的实时性,近年来无地图自主导航方法也被应用于机器人的跟随任务中。Yan等<sup>[2]</sup>提出基于模型预测控制的跟随策略,提升跟随控制的精度,但未考虑机器人在非结构化场景下的避障。Yan等<sup>[15]</sup>引入卡尔曼滤波器实现机器人在运动时对人类行走意图的估计,但对初始条件的选择较为敏感。自主导航方式由于无需处理大量地图数据,在提升控制器的响应速度上具备明显优势。

人机交互的舒适性是指机器人在执行跟随任务时,应避免给用户带来心理不适或恐慌。根据Hall<sup>[16]</sup>提出的人机空间关系学理论,人机交互空间自内向外可分为亲密区域((0, 0.45] m)、个人区域((0.45, 1.2] m)、社交区域((1.2, 3.6] m)和公共区

域((3.6, ∞) m)。其中个人区域也被定义为人机交互舒适区。机器人应在避免侵犯用户亲密区域的基础上,尽可能保持在用户个人区域内运动。

人机交互的柔顺性是指在交互过程中,机器人应主动顺应人类的运动意图变化,并确保机器人运动的平滑性。Herrera等<sup>[17]</sup>建立了一种基于阻抗控制和虚拟社会力的领航者-跟随者模型,建立社会力和机器人跟随位置的动态关系,实现对机器人的跟随控制,但其控制律是基于反馈线性化设计的,未解决移动机器人的非完整约束问题。彭建伟等<sup>[18]</sup>提出了一种基于拓展社会力模型和阻抗控制的柔顺跟随策略,通过拓展社会力模型来避免机器人侵犯目标人和行人的亲密区域,并使用阻抗控制实现柔顺跟随控制,但是该研究未在实体机器人上验证。此外,上述阻抗控制方法需要建立精确的动力学模型,同时要求其参数可以根据交互行为进行调整以实现顺应特性。为简化系统控制复杂度,可将机器人的运动控制器从阻抗控制中分离出来,设计一个参数可调的阻抗模型,其输入为人机交互力,输出为运动参考轨迹,同时在内环设计一个位置控制器,用于跟踪阻抗模型的输出,这种方案被称为导纳控制<sup>[19]</sup>。然而现有研究很少关注使用导纳控制来提升机器人陪伴跟随的柔顺性。

人机交互的安全性要求机器人具备自主避障能力,且其避障行为不应给行人带来物理和心理上的安全威胁。在传统避障方法中,Khatib等<sup>[20]</sup>提出了人工势场法,并被后续学者改进运用于机器人避障<sup>[21-22]</sup>,但该方法易受局部最优解影响。姚瀚晨等<sup>[22]</sup>提出一种虚拟弹簧跟随避障方法,实现跟随任务中机器人自主避障,但该方法响应较慢。此外,上述方法未考虑机器人避障时的自然性,可能给行人带来心理上的威胁。Fajen等<sup>[23]</sup>提出了行为动力学基本模型,Tian等<sup>[24]</sup>基于此模型实现机器人对人类避障行为的模拟,提高了避障行为的自然性,但其研究并未考虑陪伴跟随中机器人的运动控制柔顺性。

针对上述问题,本文提出了一种基于导纳控制的柔顺陪伴跟随与避障控制方法,以及一组针对社交跟随机器人的评价指标,以量化评估所提出方法的舒适度、柔顺度和安全性。

## 1 系统建模(System modeling)

双轮差速移动机器人是一种常见的轮式独立驱动机器人,具备结构简单、运行轨迹平滑等优点,适合用于社交机器人的人机跟随相关研究。

1.1 运动学模型

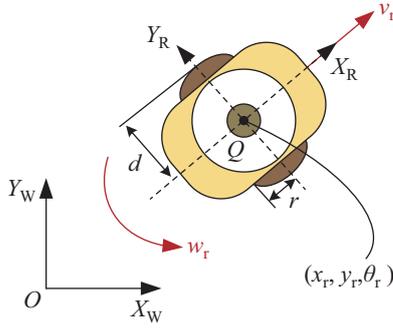


图 1 双轮差速移动机器人系统模型

Fig.1 System model of the two-wheel differential mobile robot

差速移动机器人的系统模型如图 1 所示。 $X_W O Y_W$  和  $X_R O Y_R$  分别为惯性坐标系和机器人坐标系。将惯性坐标系下机器人的质心  $Q$  的位置作为机器人的实际位置  $[x_r, y_r, \theta_r]^T$ , 机器人的前进方向为机器人坐标系  $X_R$  轴正方向。假设机器人驱动轮与地面接触良好且不发生滑移, 并忽略机器人机械传动阻尼摩擦, 可得到非完整约束下的差速机器人运动学方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ w_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $v_r$  和  $w_r$  分别为机器人的线速度和角速度。由于机器人的运动本质上是控制驱动轮转动, 因此定义  $\psi_L$  和  $\psi_R$  分别为机器人左右驱动轮转速, 建立机器人速度与左右驱动轮速的关系:

$$\begin{bmatrix} v_r \\ w_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{d} & \frac{r}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_R \\ \psi_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $d$  表示机器人轮轴中心到车轮的距离,  $r$  表示车轮的半径。

1.2 动力学模型

双轮差速移动机器人的动力学模型可根据欧拉-拉格朗日方程推导, 定义动力学状态量为世界坐标系  $X_W O Y_W$  中机器人质心  $Q$  位置  $\mathbf{q} = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ 。在不考虑相对滑移且机器人重力势能不变的前提下, 可得到非完整约束下系统的动力学模型<sup>[20]</sup>:

$$\mathbf{I}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{B}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

$$\mathbf{I}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}(\mathbf{q}) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \theta_r \\ \sin \theta_r & \sin \theta_r \\ 2d & 2d \end{bmatrix}$$

其中,  $\mathbf{I}(\mathbf{q})$  为惯性矩阵,  $m$  为机器人的质量,  $J$  是机器人绕质心  $Q$  旋转的转动惯量,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{0}_{3 \times 3}$  为系统的科里奥利矩阵, 由于该模型中机器人质心与旋转中心重合, 因此该系统产生的科里奥利力为  $\mathbf{0}$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{q})$  为系统的控制输入变换矩阵,  $\dot{\mathbf{q}}$  和  $\ddot{\mathbf{q}}$  分别为速度和加速度,  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_R, \tau_L]^T$  为驱动轮的扭矩。

1.3 人机伴随模型

人机伴随控制的目标是使机器人与人类并排行走, 实现机器人与目标人的相对位置和角度控制。如图 2 所示, 定义目标人在世界坐标系  $X_W O Y_W$  中的坐标为  $[x_h, y_h, \theta_h]^T$ , 人机伴随系统状态量为  $\boldsymbol{\zeta} = [\rho, \alpha, \beta]^T$ , 其中  $\rho = \sqrt{(x_r - x_h)^2 + (y_r - y_h)^2}$  为机器人和目标人的相对距离,  $\alpha$  为机器人和目标人之间的相对方位角,  $\beta = \theta_r - \theta_h$  为机器人和目标人的相对朝向角。定义人机伴随系统的期望状态为  $\boldsymbol{\zeta}_d = [\rho_d, \alpha_d, \beta_d]^T$ , 其中  $\rho_d$  为期望伴随距离,  $\alpha_d = \pi/2$  和  $\alpha_d = 3\pi/2$  分别对应机器人在目标人左侧以及右侧的伴随模式, 由于伴随过程中机器人需要保持前进方向与目标人方向一致, 因此  $\beta_d = 0$ 。在预设期望伴随状态下机器人的期望位姿为

$$\mathbf{X}_d = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ \theta_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_h + \rho_d \cos(\alpha_d + \theta_h) \\ y_h + \rho_d \sin(\alpha_d + \theta_h) \\ \theta_h + \beta_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据机器人的当前位姿以及期望位姿, 可建立机器人的伴随位姿误差模型  $\mathbf{X}_e = \mathbf{X}_r - \mathbf{X}_d$ :

$$\mathbf{X}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r - x_h - \rho_d \cos(\alpha_d + \theta_h) \\ y_r - y_h - \rho_d \sin(\alpha_d + \theta_h) \\ \theta_r - \theta_h - \beta_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

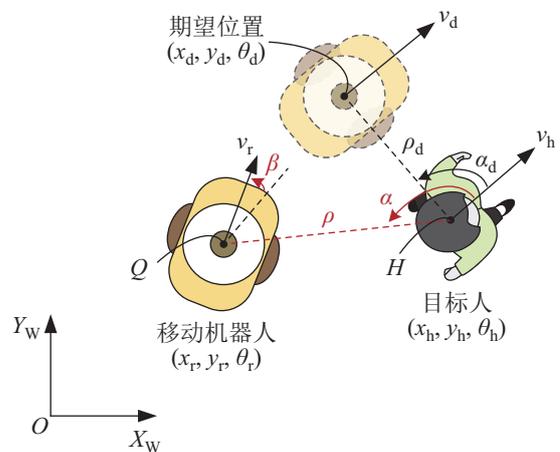


图 2 人机伴随模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the human-accompanying model

## 2 柔顺伴随控制器 (Compliant human-accompanying controller)

为了优化人机伴随过程中机器人运动控制的柔顺性, 在人机伴随模型的基础上引入了基于导纳控制的主动柔顺策略, 同时结合虚拟交互力模型修正期望控制量, 以模拟人机交互的动态行为, 并通过内环的位置控制器跟踪机器人位姿。此外, 引入行为动力学模型设计避障控制器, 解决了人机共融环境中机器人的避障问题。

### 2.1 基于虚拟交互力的导纳控制器

机器人的柔顺控制通过人机伴随模型对虚拟交互力进行动态反馈控制, 使伴随系统具备运动柔顺性, 增强系统对环境的适应性及目标人的舒适度。本文提出的基于导纳控制的柔顺伴随控制策略结构如图3所示, 整体控制模型为双闭环结构。其中, 外环导纳模型根据交互力模型输出的交互力矩, 对机器人的期望控制量进行修正, 内环控制器则驱动机器人跟踪期望控制量以实现位置跟踪。

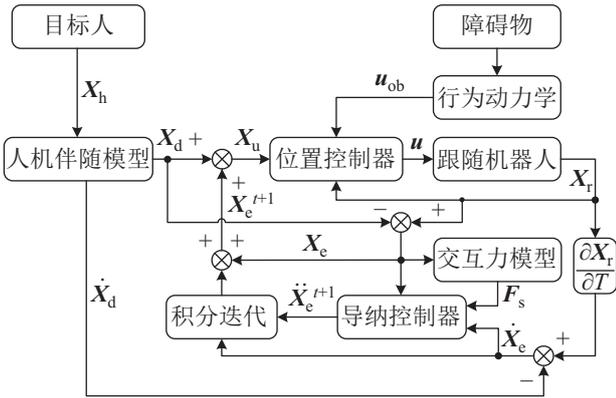


图3 人机柔顺伴随与避障控制策略

Fig.3 Diagram for the compliant human-accompanying and obstacle-avoidance control strategy

根据导纳控制算法原理可知, 当存在交互力矩时, 导纳控制器的输出控制量会顺应交互力修正, 以模拟人机交互过程中的柔顺行为。根据机器人伴随误差模型(5), 可建立期望导纳模型:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}_e + \mathbf{B}\dot{\mathbf{X}}_e + \mathbf{K}\mathbf{X}_e = \mathbf{F}_d \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{M} = \text{diag}(i_x, i_y, i_\theta)$ 、 $\mathbf{B} = \text{diag}(b_x, b_y, b_\theta)$  和  $\mathbf{K} = \text{diag}(k_x, k_y, k_\theta)$  分别为惯性矩阵、阻尼矩阵和弹性矩阵, 且系数  $i, b, k$  均大于 0,  $\dot{\mathbf{X}}_e = \dot{\mathbf{X}}_r - \dot{\mathbf{X}}_d$ ,  $\ddot{\mathbf{X}}_e = \ddot{\mathbf{X}}_r - \ddot{\mathbf{X}}_d$ , 分别为误差模型的 1 阶和 2 阶状态量。此外, 本研究采用人机虚拟交互力模型<sup>[25]</sup>描述期望导纳力  $\mathbf{F}_d$ 。

如图4所示, 基于人机交互空间关系学<sup>[7]</sup>建立人机虚拟交互力模型。该模型建立一个以人为中心

的交互区域<sup>[26]</sup>, 其中机器人应避免进入亲密区域, 以免给目标人带来不适, 从而提高目标人的舒适度。因此, 本研究设计了一个半径为  $\rho_d$  的虚拟力阈值区, 其半径略大于目标人亲密区域以提供减速缓冲。当人机距离小于作用阈值时, 将产生虚拟交互排斥力  $\mathbf{f}_s$  使机器人离开该区域, 该交互力的大小  $f_s$  可定义为<sup>[17]</sup>

$$f_s = \begin{cases} 0, & \rho > \rho_d \\ \gamma \frac{\exp(-\rho^n/\rho_d) - \exp(-\rho_d^{n-1})}{1 - \exp(-\rho_d^{n-1})}, & \rho \leq \rho_d \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\gamma$  为力增益系数,  $n$  表示阶数,  $\rho_d$  为人机期望伴随距离。

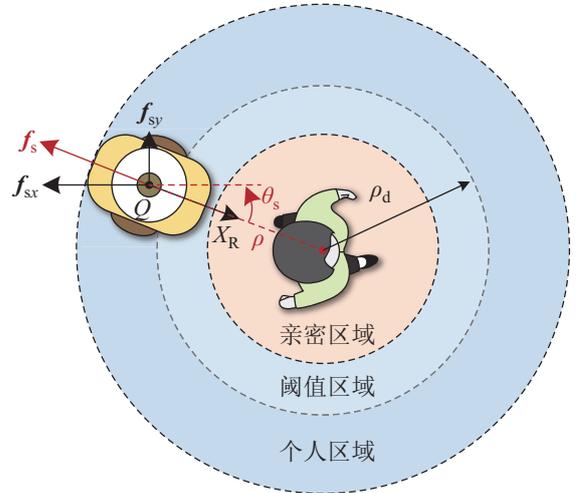


图4 人机虚拟交互力模型

Fig.4 Virtual human-robot interaction force model

将虚拟交互排斥力在坐标系  $X_W O Y_W$  下分解:

$$\mathbf{f}_s = [-f_{sx}, -f_{sy}]^T \quad (8)$$

其中,  $f_{sx} = f_s \cos \theta_s$  为排斥力在  $X$  轴方向上的大小,  $f_{sy} = f_s \sin \theta_s$  为排斥力在  $Y$  轴方向上的大小,  $\theta_s$  为机器人连接线与世界坐标系  $X_W$  轴的夹角。

由于本文导纳控制器的期望导纳力全部由交互力提供, 因此令  $\mathbf{F}_d = \mathbf{f}_s$ 。将式(8)代入式(6)可得到导纳控制器控制律:

$$\ddot{\mathbf{X}}_e = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}_s - \mathbf{B}\dot{\mathbf{X}}_e - \mathbf{K}\mathbf{X}_e) \quad (9)$$

由于微分迭代法容易引入噪声干扰并影响系统稳定性, 因此对式(9)在离散时域内使用积分迭代法, 假设系统的采样时间为  $T$ , 则有  $\dot{\mathbf{X}}_e^{t+1} = \dot{\mathbf{X}}_e + \ddot{\mathbf{X}}_e T$ ,  $\mathbf{X}_e^{t+1} = \mathbf{X}_e + \dot{\mathbf{X}}_e T$ , 代入式(9)可得:

$$\mathbf{X}_u = \mathbf{X}_d + (\mathbf{X}_e + (\mathbf{X}_e^{t+1} + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}_s - \mathbf{B}\dot{\mathbf{X}}_e - \mathbf{K}\mathbf{X}_e)T)T) \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{X}_u = [x_u, y_u, \theta_u]^T$  为外环控制器修正后机器人的期望位姿。当目标人突然靠近或加减速时, 虚拟交互力可使导纳控制器输出的期望位姿顺应目标人的位置变化, 并通过合理的导纳参数抑制机器人期望位姿的抖动, 增强平滑性和稳定性, 提高系统柔顺性。

导纳控制模型内环位置控制器旨在跟踪外环控制器输出的期望控制量, 通常采用 PID 控制器。将机器人的位置误差转换到其局部坐标系  $X_R Q Y_R$  下:

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_u \\ y_r - y_u \end{bmatrix} \quad (11)$$

为了提升人机伴随运动的协调性, 要求机器人具备跟踪目标人运动方向的能力<sup>[27]</sup>。因此在角速度控制器中增加了机器人方向角控制补偿量, 可得位姿控制器的控制律:

$$\mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{pv}e_x + K_{dv}\dot{e}_x \\ K_{pw}e_y + K_{dw}\dot{e}_y + \sigma \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{u}_0$  为伴随控制器的输出,  $K_{pv}, K_{dv}$  为线速度比例增益和微分增益,  $K_{pw}, K_{dw}$  为角速度比例增益和微分增益。  $\sigma$  为方向角跟踪补偿量。

由于轮式机器人存在非完整约束, 其方向角控制和位置控制存在耦合。为满足伴随任务的要求, 机器人需优先保持人机相对位置以维持队形, 稳定后再跟踪目标人的运动方向。因此, 设定补偿量  $\sigma$  仅在位置误差收敛到一定阈值  $\psi$  后生效,  $K_{p\theta}$  为方向角补偿增益:

$$\sigma = \begin{cases} 0, & e_x > \psi \text{ 或 } e_y > \psi \\ K_{p\theta}\theta_e, & e_x \leq \psi \text{ 且 } e_y \leq \psi \end{cases} \quad (13)$$

## 2.2 基于行为动力学的避障策略

根据对人类的行走行为的研究<sup>[23]</sup>, 在遇到障碍物时, 人类通常不会采取“保持面向障碍物方向并作减速”的做法, 而倾向于转向躲避, 与障碍物的正对角度和相对距离会同时影响人类的避障行为。因此, 可建立行为动力学模型以模拟人类遇到障碍物时的避障行为。假设  $d_{ob}$  是人与障碍物之间的相对距离,  $d_s$  为障碍物影响距离, 行为动力学模型建模如下:

$$\Lambda_{ob} = \begin{cases} 0, & d_{ob} > d_s \\ -k_0\phi\exp(-c_1|\phi|)\exp(-c_2d_{ob}), & d_{ob} \leq d_s \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\Lambda_{ob}$  为避障角速度分量,  $\phi$  为障碍物在机器人坐标系  $X_R O Y_R$  下的方位角,  $k_0, c_1, c_2$  为避障控制器调节系数且均为正数,  $\exp(-c_1)|\phi|$  和  $\exp(-c_2d_{ob})$  分别为目标人与障碍物相对角度和相对距离的避障分量因子。

假设环境中存在  $N_{ob}$  个障碍物, 定义第  $i$  个障碍物的避障角速度分量为  $\Lambda_{ob}^i$ 。由于人类在遇到障碍物时, 倾向于优先调整其行进方向而非减速, 因此所设计的避障控制器只对机器人的角速度进行调节, 则遇到第  $i$  个障碍物时避障控制器的输出为

$$\mathbf{u}_{ob}^i = [0, \Lambda_{ob}^i]^T \quad (15)$$

将上述各避障分量叠加, 结合位姿控制器(11), 可获得集成行为动力学避障模块的伴随控制律:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \sum_{i=0}^{N_{ob}} \mathbf{u}_{ob}^i \quad (16)$$

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

设计了一系列实验量化评估所提出的柔顺伴随与避障控制策略的结果, 定义了伴随控制性能的 4 个评价指标, 在 Matlab 仿真平台和实体机器人平台上验证控制算法的性能。为了在仿真实验中尽可能准确地得到本方法的最优参数, 采用实体机器人平台的物理参数设定仿真中的机器人参数, 如表 1 所示。在实物实验中, 由于机器人采用算法端和执行端分离模式, 因此实物实验参数也与仿真实验相同, 并在实验中根据经验调试选定, 如表 2 所示。其中, 导纳参数对机器人跟随性能有较大影响, 交互力总增益  $\gamma$  控制虚拟交互力的强弱, 刚度系数  $k$  和阻尼系数  $b$  分别影响机器人对交互力的响应速度和能量耗散度, 共同决定跟随系统的柔顺特性。

### 3.1 评价指标

目前, 学术界和产业界均缺乏统一的机器人伴随控制性能评价指标。为了综合评估伴随控制器的性能, 本文定义了 4 个评价指标 (这些指标的数值越小, 控制性能越好)。

表 1 机器人参数

Tab.1 Robot parameters

序号	参数	量值
1	机器人质量 $m$ /kg	40
2	驱动轮半径 $r$ /m	0.07
3	轮轴中心到车轮距离 $d$ /m	0.25
4	转动惯量 $J$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	0.08

表2 实验参数  
Tab.2 Experimental parameters

序号	参数	量值
1	导纳惯性系数 $i$	0.01
2	导纳阻尼系数 $b$	0.05
3	导纳刚度系数 $k$	0.20
4	PID 线速度比例/微分增益 $[K_{pv}, K_{dv}]$	[15.1,10.0]
5	PID 角速度比例/微分增益 $[K_{pw}, K_{dw}]$	[10.0,10.2]
6	方向角补偿增益 $K_{p\theta}$	1.3
7	方向角补偿阈值 $\psi/m$	0.2
8	交互力总增益 $\gamma$	3.0
9	交互力阶数 $n$	3
10	行为动力学避障总增益 $k_0$	60
11	避障方位角/距离增益 $[c_1, c_2]$	[0.42,0.1]
12	跟随距离 $\rho_d/m$	1.0

- 状态误差均方根 ( $E_{RMS}$ , 描述机器人的伴随精度):

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_{task}} \sum_{t=0}^{T_{task}} (\zeta_t - \zeta_t^d)^2} \quad (17)$$

其中,  $T_{task}$  为伴随任务总时间,  $\zeta_t$  和  $\zeta_t^d$  分别为在  $t$  时刻机器人的实际伴随状态  $\zeta$  和期望伴随状态  $\zeta^d$ 。

- 柔顺度指标为速度变化均方根 ( $V_{RMS}$ , 描述机器人伴随状态量收敛前控制量变化的剧烈程度):

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_{end} - T_{start}} \sum_{t=T_{start}+1}^{T_{end}} (\mathbf{u}_t - \mathbf{u}_{t-1})^2} \quad (18)$$

其中,  $\mathbf{u}_t$  和  $\mathbf{u}_{t-1}$  分别为系统  $t$  时刻及上一时刻的速度控制量,  $T_{start}$  为开始时刻,  $T_{end}$  为状态量最终收敛时刻。

- 舒适度指标为不适时间 ( $T_{uc}$ , 描述机器人在伴随过程中给目标人带来不适感的总时间, 即机器人维持其在目标人舒适区域的能力):

$$T_{uc} = \sum_{t=0}^{T_{task}} \delta_t, \quad \delta_t = \begin{cases} 0, & 0.6 \leq \rho \leq 1.2 \\ T, & \rho < 0.6 \text{ 或 } \rho > 1.2 \end{cases} \quad (19)$$

其中, 舒适区域的阈值是根据人机空间关系学<sup>[28]</sup>及机器人的物理结构尺寸确定的。

- 安全性指标为避障失败率 ( $P_{fail}$ , 描述机器人在伴随实验中与障碍物发生碰撞, 或避障后

无法回归伴随模式的次数  $N_{fail}$  占总实验次数  $N_{exp}$  的概率, 以评价机器人的安全的自主避障能力):

$$P_{fail} = N_{fail}/N_{exp} \quad (20)$$

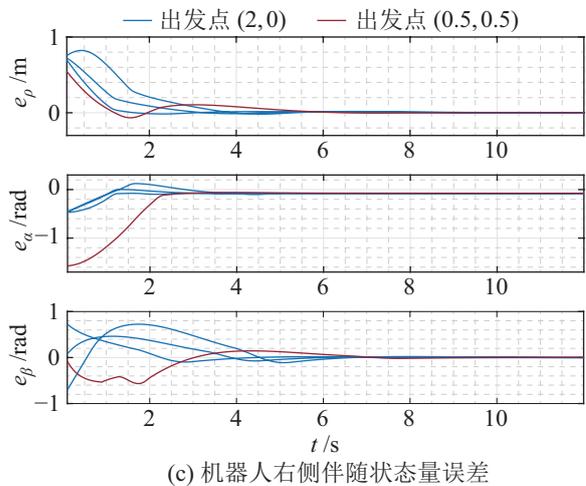
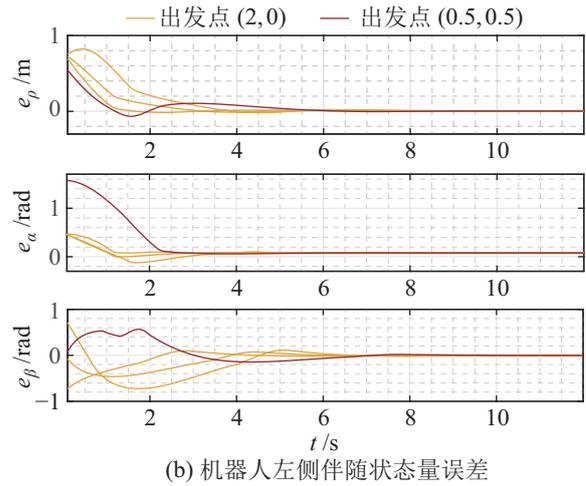
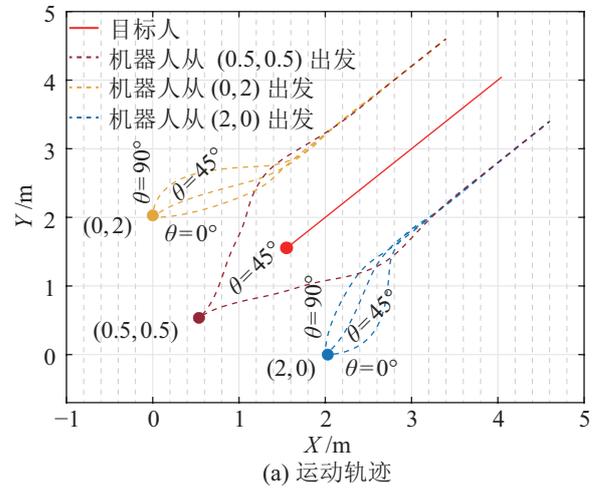


图5 无障碍环境下机器人直线伴行仿真实验

Fig.5 Simulation experiment of the robot human-accompanying along a straight trajectory in an obstacle-free environment

### 3.2 仿真实验

仿真实验在 Matlab 2021b 中进行, 实验平台为 Intel i7-12700 处理器。由于人类日常的行走行为主要可以分为直线运动和转向运动 2 种, 因此本文首先选择直线轨迹作为目标人的运动轨迹, 并通过改变机器人的初始位姿以及伴随模式验证所提出伴随策略的有效性。图 5 是机器人在仿真环境中执行直线伴随任务的实验结果, 在本实验中, 机器人通过改变初始位姿, 在不同的模式下陪伴目标人运动, 以模拟伴随任务在现实环境下的多种状态。

图 5(a) 是人机伴随实验的轨迹图, 目标人和机器人的出发点均为实心圆点。黄色轨迹表示机器人从 (0,2) 出发, 以 3 种不同的初始角度进行左侧伴随的运动轨迹; 蓝色轨迹中机器人初始点为 (2,0), 伴随模式为右侧; 棕色轨迹则表示机器人从目标人后方 (0.5,0.5) 出发进行左右伴随的运动轨迹。图 5 (b)(c) 为机器人伴随任务的状态量曲线图, 各状态量曲线的颜色与其运动轨迹的颜色一致。机器人从不同的位置出发后, 不论是左侧伴随还是右侧伴随模式, 人机之间的相对距离、方向角和朝向角均快速收敛到设定值, 且在经过 3 s 后基本维持不变, 实验结果初步验证该伴随方法的可行性。

为了对比分析本文的导纳伴随策略在柔顺性上的优势, 引入与传统 PID 法<sup>[10]</sup>和 VSM 法<sup>[22]</sup>的伴随对比实验, 实验结果如图 6 所示。3 种伴随实验中目标人的轨迹均保持一致, 初始时刻机器人从同一位置出发, 和目标人存在一定的初始距离, 其余仿真参数均保持一致。图 6(a) 中机器人和目标人从 (0,2) 处出发, 由黄色虚线相连的三角标记为机器人和目标人在同一时刻的位置。其中, 采用 PID 法和 VSM 法的机器人运动轨迹在  $t_2$  时刻存在明显的过冲, 人机距离也明显过小, 且采用 VSM 法的机器人在  $t_3$  和  $t_4$  时刻的跟随存在滞后。而采用导纳方法的机器人运动轨迹较为平滑, 并且由于在人机间设置了虚拟交互力, 机器人在加速向目标人运动的过程中, 会因惯性不可避免地进入目标人的阈值区域。此时虚拟交互力会引导机器人与目标人保持足够大的距离, 避免侵犯目标人的私密区域, 因此导纳方法下机器人轨迹不存在过冲。由图 6(b)(c) 可知, 在  $t_1 \sim t_2$  时刻, 由于初始时刻的状态量误差较大, 采用 PID 法的机器人的控制量会发生突变, 而采用 VSM 法的机器人的控制量在收敛后振荡较为明显。但采用导纳控制方法的机器人的控制量全程的变化较为平滑, 控制量输出也未触及阈值上限, 在跟踪任务中机器人控制量的变化较小, 并且在  $t_3$

时刻收敛至目标人速度后未发生明显振荡。相较于 PID 和 VSM 法, 上述实验结果验证了本方法在提升控制系统柔顺度上的优势。

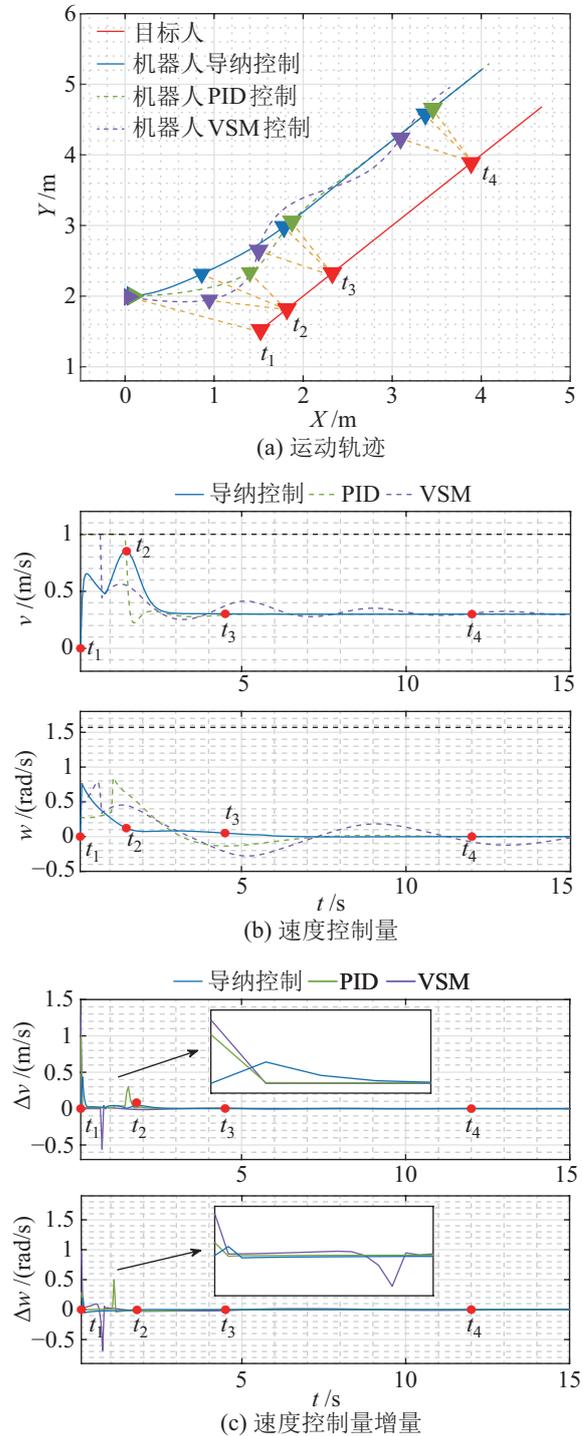


图 6 对比 3 种方法的直线轨迹仿真实验

Fig.6 Straight trajectory simulation experiments to compare the three methods

为了进一步说明本文柔顺伴随方法的综合性能, 采用更为复杂的 8 字形的目标人轨迹重复了上述对比试验, 并根据所提出的控制器性能评价指标 (式 (17)~(19)) 进行计算, 结果如表 3 所示。

表3 仿真对比实验结果

Tab.3 Results of the simulation comparison experiments

轨迹	方法	$E_{RMS}$			$V_{RMS}$		$T_{uc} /s$
		$\rho$ /m	$\alpha$ /rad	$\beta$ /rad	$v$ /(m/s)	$w$ /(rad/s)	
直线	导纳	0.010	0.042	0.032	<b>0.002</b>	<b>0.005</b>	0.0
	PID	0.006	0.031	0.020	0.008	0.028	0.4
	VSM	0.026	0.112	0.068	0.006	0.021	1.1
8字形	导纳	0.017	0.039	0.053	<b>0.009</b>	<b>0.004</b>	0.0
	PID	0.018	0.023	0.034	0.021	0.018	0.9
	VSM	0.077	0.135	0.091	0.019	0.016	1.6

根据表3中的  $E_{RMS}$  指标, 基于导纳方法和PID法的机器人跟踪精度均较优, 而VSM法在方向角跟踪上存在较大误差, 表明所提出的导纳方法对人类日常行走中常见的直线运动和转向运动都具备较好的跟踪性能。此外, 对采用3种方法设计实验所得全部  $V_{RMS}$  结果计算加权平均值, 可发现导纳方法在柔顺度指标上相较于PID法优化了69.6%, 且相较于VSM法优化了67.1%, 在人类存在意图突变的8字形轨迹上尤为明显。此外, 在舒适度指标  $T_{uc}$  上, 采用PID法和VSM法的机器人均给目标人带来了不适, 而导纳控制的机器人全程未侵犯目标

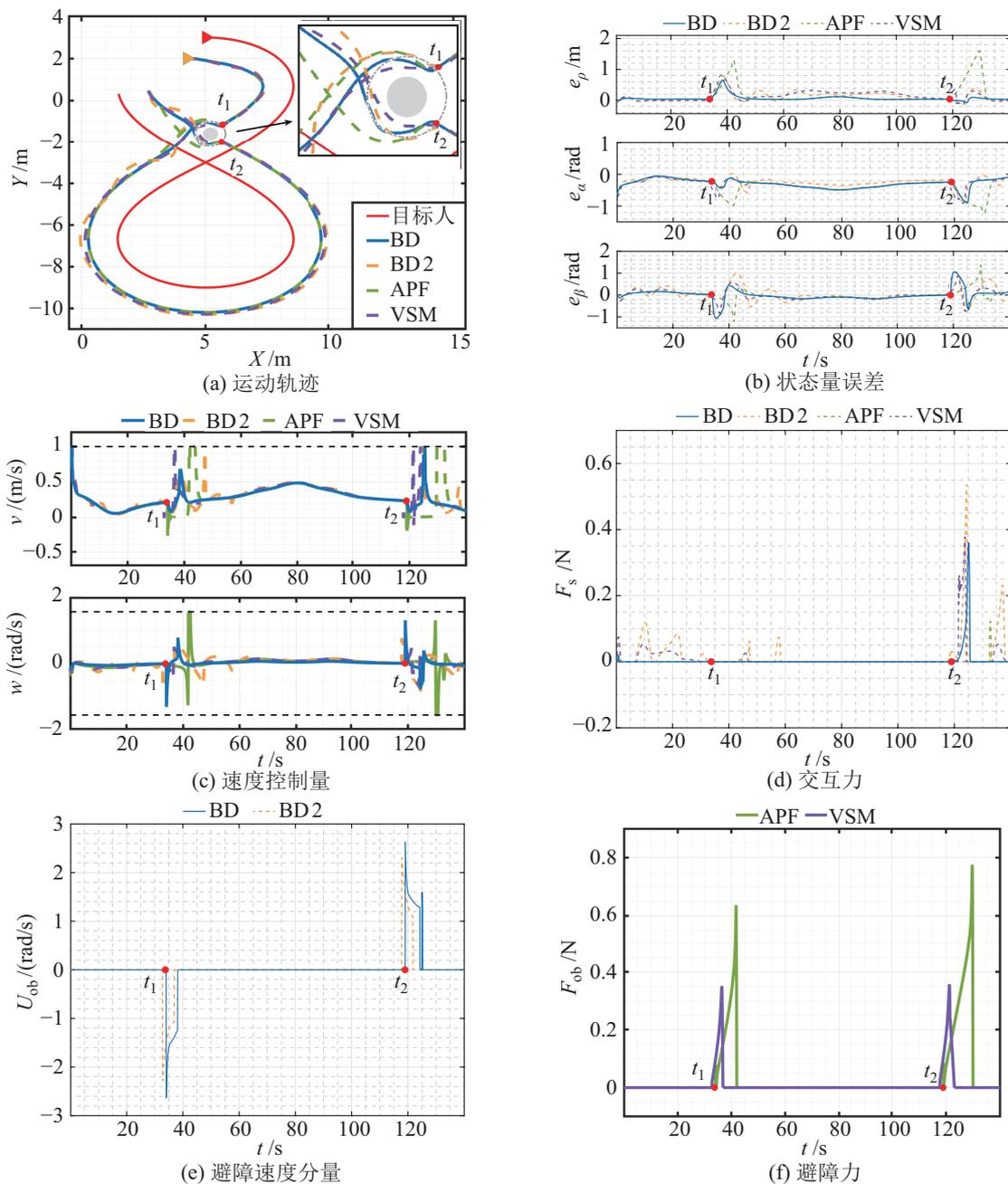


图7 有障碍环境下机器人8字形轨迹伴行仿真实验

Fig.7 Simulation experiment of the robot human-accompanying along a 8-shaped trajectory in an environment with obstacles

人的亲密区域, 保障了目标人的舒适度。实验结果证明, 本方法明显提升了目标人的舒适度。

为了验证本文控制器集成的 BD (行为动力学) 模型的避障性能, 以及方向角补偿控制量的作用, 在同一导纳控制器下设计避障对比实验。分别选用 VSM<sup>[22]</sup> 和 APF<sup>[29]</sup> 方法作为避障策略与本文方法对比。VSM 法假设障碍物边缘上固定着无数与边线垂直的虚拟弹簧, 通过挤压虚拟弹簧产生弹力来引导机器人避障。而 APF 法是在障碍物周围设置 Khatib 势场<sup>[20]</sup>, 对排斥力分解得到避障速度控制量。此外, 在同一行为动力学避障控制器下, 对比无方向角控制量补偿时机器人的表现以验证该补偿量的作用, 实验结果在图 7 中标记为 BD2。

图 7(a) 中灰色圆形阴影为半径 0.3 m 的障碍物, 其影响半径  $d_s$  为 0.6 m,  $t_1$ 、 $t_2$  为避障函数两次发挥作用的起始时刻。根据轨迹可知 APF 法下机器人避障需绕行更远的距离, 而 VSM 法响应较慢导致机器人离障碍物距离过近。此外, 在无方向角控制量补偿时, 机器人轨迹存在明显的超调和振荡。

图 7(b) 中采用 BD 法的机器人的伴随误差在  $t_1$  和  $t_2$  处明显小于 APF 法和 VSM 法, 即在避障时机器人能更好地维持原有的伴随状态, 有助于提升后续伴随任务的稳定性。此外, 无方向角控制量补偿的机器人的伴随误差更大且收敛速度较慢。

图 7(c) 中  $t_1$  到  $t_2$  时段内避障函数发挥作用, 机器人控制量会被快速地调整。根据实验结果可知, 采用 APF 法和 VSM 法时避障势场力分量会显著降低机器人的线速度, 在避障后控制器需输出更大的控制量以补偿机器人的速度损失。而 BD 法仅调节机器人角速度, 因此其控制量变化更为平稳, 有助于提升人机伴随过程的安全性。

图 7(d) 中  $t_2$  处当机器人向目标人一侧规避障碍物时, 会不可避免地进入交互力阈值区域并产生排斥力矩, 此时驱动导纳控制器会引导机器人与人类维持合适的距离, 保障人类的舒适度。

为了进一步验证 BD 法在提升避障成功率上的优势, 在图 7 实验基础上, 将障碍物随机设置在机器人预期行进轨迹中。若机器人遇到障碍物时无法绕开或未能在避障后继续完成伴随任务, 则判定为避障失败, 根据指标 (20) 计算 3 种方法下机器人的避障失败率, 得到如表 4 所示实验结果。其中, 采用 BD 法时机器人避障失败率明显低于 APF 法和 VSM 法, 其原因是 APF 法的避障函数容易陷入局部最优解, 而 VSM 法响应速度较慢, 导致避障时机器人无法输出足够的调整量以规避障碍物。

表 4 仿真避障任务结果

Tab.4 Simulation results of obstacle avoidance tasks

	BD	APF <sup>[29]</sup>	VSM <sup>[22]</sup>
(7.3, 0.5)	成功	成功	失败
(0.5, -1.7)	成功	成功	成功
(5.0, -1.4)	成功	失败	成功
(2.5, -3.0)	成功	成功	失败
障碍物位置 (X, Y)			
(0.5, -7.5)	失败	失败	失败
(4.0, -10)	成功	失败	成功
(8.5, -9.0)	成功	成功	失败
(7.0, -3.0)	成功	成功	成功
(6.5, -2.3)	成功	成功	成功
(4.0, -1.0)	成功	失败	失败
$P_{fail}$	10%	40%	50%

上述实验结果验证了行为动力学相较于传统人工势场法在提升机器人自主避障性能上的优势, 同时验证了方向角控制量补偿的有效性。

### 3.3 实物实验

为了验证所提方法在实体机器人系统上的有效性, 选用两轮差速移动机器人作为实验平台, 通过主从机通信模式实现算法运算端和执行端的分离, 整体实验配置如图 8 所示。人机伴随算法部署在运行 Matlab 的笔记本上, 与车载计算机 ROS 系统在局域网配置成主从机通信模式, ROS 系统中部署了底盘运动控制节点和传感器数据采集节点, 接收算法端发送的控制量并控制机器人移动。此外, 在实体机器人上装配了一套 Amfitech 公司的电磁跟踪定位模块, 型号为 AmfiTrack-Gen2。该模块的工作原理是基于磁偶极子模型对发射端生成的交变磁场

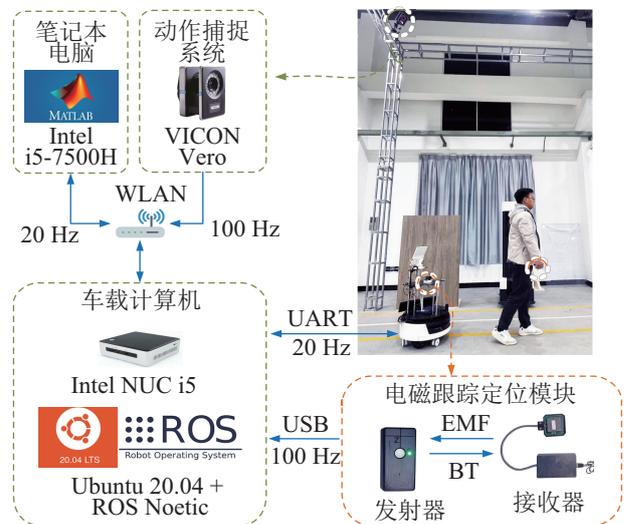


图 8 人机伴随系统实验配置图

Fig.8 Experiment setup for the human-accompanying system

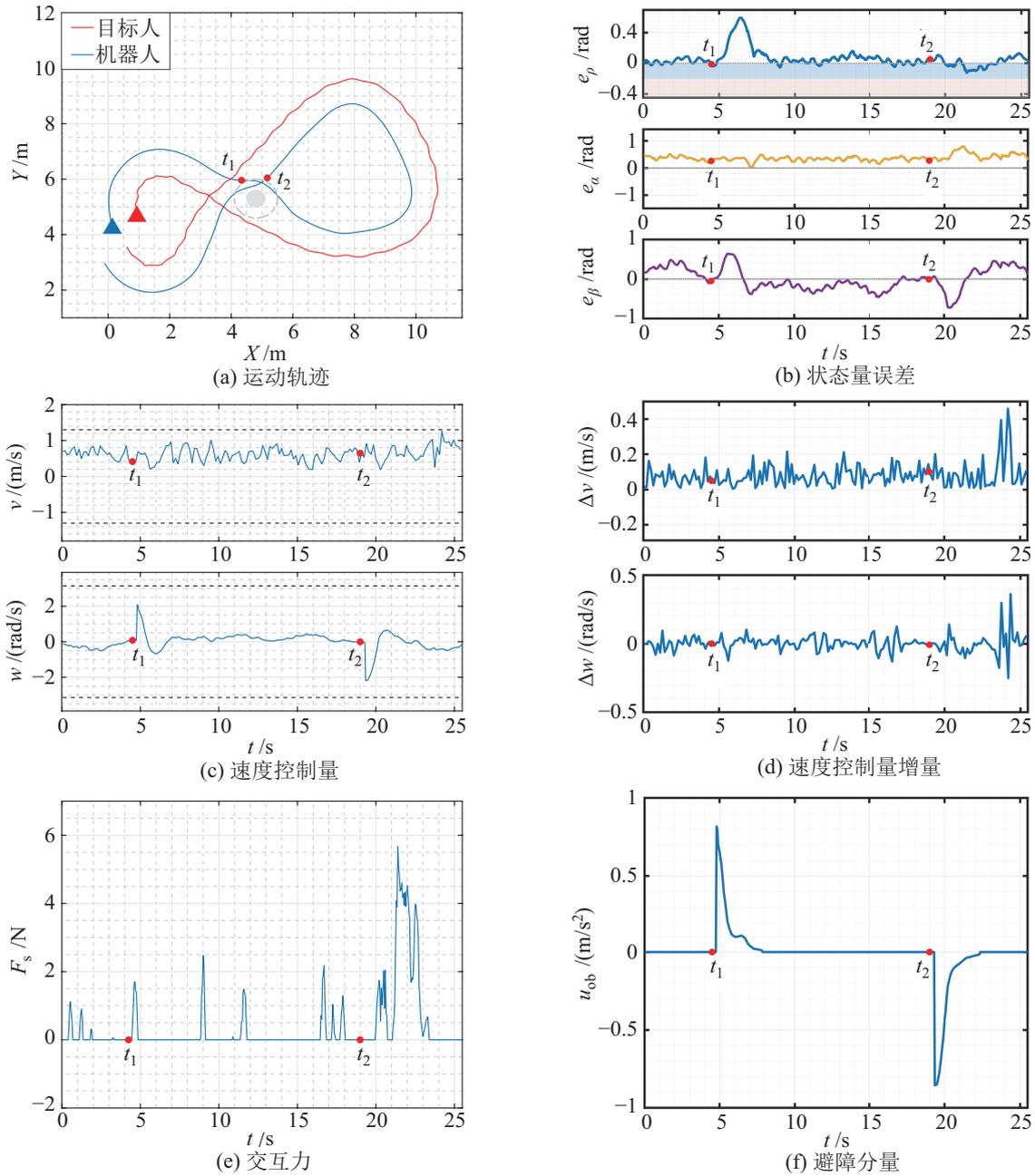


图9 有障碍环境下社交机器人实体实验

Fig.9 Experiment for human-accompanying robot with obstacles in real-world

进行求解,得到目标人身上所佩戴的信标的3维位姿,该信标可放置于口袋或固定于衣物上。由于电磁信号具备穿透性,因此在有遮挡环境下仍可进行稳定的位姿跟踪。

实体机器人伴随实验中目标人行走轨迹为8字形,设定机器人伴随模式为目标人的左侧,并在轨迹相交处设置了木桩障碍物。通过VICON光学运动捕捉系统捕获目标人和障碍物的实时位姿,并记录机器人和目标人的运动轨迹,采用所提出的导纳控制伴随方法和行为动力学避障方法设计了一组跟随实验,实验结果如图9所示,其中 $t_1$ 、 $t_2$ 分别为

两次避障的开始时刻。此外,根据所定义的评价指标,实验结果如表5所示。

表5 实体实验结果  
Tab.5 Physical experiment results

$\mathbf{E}_{\text{RMS}}$		$\mathbf{V}_{\text{RMS}}$		$T_{\text{uc}}$	$P_{\text{fail}}$	
$\rho$ /m	$\alpha$ /rad	$\beta$ /rad	$v$ /(m/s)	$w$ /(rad/s)	/s	%
0.014	0.033	0.029	0.048	0.021	0.0	5.0

根据图9(a)中的人机轨迹可知,实体机器人从实心三角标记处出发陪伴人类运动,在遇到木桩障碍物时机器人能避障绕行,在约25s后回到起始位

置附近完成跟随任务。由于人类的自然行走存在左右摆动, 因此目标人的运动轨迹呈现周期性波动, 但并未影响到机器人运动轨迹的平滑性, 验证了实体机器人实验中伴随运动的柔顺性。

如图 9(b) 所示, 除了避障开始的  $t_1$  和  $t_2$  时刻机器人需绕开障碍物而短时间偏离设定状态以外, 其余时刻状态量误差均维持在一个较小值并保持稳定。此外, 根据表 5 中数据可知, 伴随任务的状态量误差  $E_{RMS}$  基本接近 0, 即机器人能维持稳定的伴随状态。图 9(c) 中机器人伴随速度控制量均未超过图中虚线表示的安全上下限。表 5 中  $V_{RMS}$  指标值较小, 证明了机器人实际速度变化也较为平滑, 此外  $P_{fail}$  指标仅 5% 也证明了实体机器人在多数非结构化场景下能自主规避障碍物, 验证了实体机器人在执行伴随任务时的安全性。

如图 9(e) 所示, 由于实体机器人的质量较大, 驱动轮对控制信号的响应也存在滞后, 因此在伴随过程中机器人会偶尔进入虚拟交互力的阈值区, 此时交互力的介入会对下一时刻机器人的控制量进行补偿, 引导机器人离开阈值区。表 5 中实验评价指标  $T_{uc}$  也验证了在整个伴随过程中机器人未入侵过目标人的亲密区域, 保障了目标人的舒适度。实物实验视频链接如下: <https://www.bilibili.com/video/BV1Ju411p7aK>。

#### 4 结论 (Conclusion)

社交机器人在与被陪伴人并排行走时的运动控制性能不足限制了其实际应用。因此, 本文设计了一种基于导纳控制的人体伴随与避障控制方法, 以提升人机共融环境下被伴随人的舒适度、运动控制的柔顺度和非结构化场景下自主避障的安全性。首先, 该方法将人机交互力模型与导纳控制器结合以实现机器人的柔顺伴随, 提升机器人模拟人类遵守社交规则的自主能力, 改善了用户在伴随任务中的舒适度。其次, 在伴随控制器中引入行为动力学避障模型, 实现非结构化场景下机器人的自主避障。此外, 为伴随控制器设计了一组评价指标, 并在仿真环境下设计了验证实验, 证明该方法对不同目标人轨迹均有较好的跟随性能。为验证人体伴随性能, 设计与传统 PID 和虚拟弹簧模型法的对比实验, 证明了所提出方法具有更好的控制柔顺度和用户舒适度。为验证避障性能, 将本文行为动力学模型与人工势场法和虚拟弹簧模型法进行了避障对比实验, 证明了该模型在提升系统安全性上的优势。最后, 将该伴随方法移植到实体机器人上, 实机实

验结果中柔顺度和舒适度指标与仿真结果类似, 均维持在较小的数值, 安全性指标方面避障失败率也仅为 5%, 证明了该方法的有效性和可行性。

未来将在本文的基础上进行深入研究。在感知环节, 将激光雷达和 RGB-D 相机融合, 提高社交机器人的环境感知能力; 在控制环节, 采用自适应方法对导纳控制器参数进行自适应整定, 提升控制器的鲁棒性和自适应性; 在决策环节, 根据环境信息实现伴随模式的智能决策切换, 以提高机器人的自主性以及社会接受度。还将尝试将研究成果应用于更多的非结构化环境中, 以应对现实生活中的各种复杂场景。

#### 参考文献 (References)

- [1] 王天然. 机器人技术的发展[J]. 机器人, 2017, 39(4): 385-386.  
WANG T R. Development of the robotics[J]. Robot, 2017, 39(4): 385-386.
- [2] YAN S H, TAO J, HUANG J, et al. Model predictive control for human following rehabilitation robot[C]//IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 369-374.
- [3] GROSS H M, DEBES K, EINHORN E, et al. Mobile robotic rehabilitation assistant for walking and orientation training of stroke patients: A report on work in progress[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 1880-1887.
- [4] 陈少华, 陈逸凡, 林木泉. 一种物料搬运自动跟随机器人装置的设计[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(9): 7-9.  
CHEN S H, CHEN Y F, LIN M Q. Design of an automatic following robot device for material handling[J]. Digital Technology & Application, 2021, 39(9): 7-9.
- [5] 谢嘉, 桑成松, 王世明, 等. 智能跟随移动机器人的研究与应用前景综述[J]. 制造业自动化, 2020, 42(10): 49-55.  
XIE J, SANG C S, WANG S M, et al. Overview of research and application prospect of intelligent following mobile robot[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(10): 49-55.
- [6] ISLAM M J, HONG J, SATTAR J. Person-following by autonomous robots: A categorical overview[J]. International Journal of Robotics Research, 2019, 38(14): 1581-1618.
- [7] MORALES Y, KANDA T, HAGITA N. Walking together: Side-by-side walking model for an interacting robot[J]. Journal of Human-Robot Interaction, 2014, 3(2): 50-73.
- [8] COSTA M. Interpersonal distances in group walking[J]. Journal of Nonverbal Behavior, 2010, 34: 15-26.
- [9] MANAWADU U A, DEEN M A H, DE SILVA P R S. Exploring a comfort zone in side-by-side communication for human-robot interaction[C]//2nd International Conference on Image Processing and Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ICIPRob54042.2022.9798732.
- [10] YAO H C, DAI H D, ZHAO E H, et al. Laser-based side-by-side following for human-following robots[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 2651-2656.

- [11] XUE G, YAO H C, ZHANG Y C, et al. UWB-based adaptable side-by-side following for human-following robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 333-338.
- [12] FERRER G, GARRELL A, SANFELIU A. Robot companion: A social-force based approach with human awareness-navigation in crowded environments[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 1688-1694.
- [13] REPISO E, GARRELL A, SANFELIU A. People's adaptive side-by-side model evolved to accompany groups of people by social robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 2387-2394.
- [14] KÄSTNER L, FATLOUN B, SHEN Z C, et al. Human-following and -guiding in crowded environments using semantic deep-reinforcement-learning for mobile service robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 833-839.
- [15] YAN Q Y, HUANG J, YANG Z H, et al. Human-following control of cane-type walking-aid robot within fixed relative posture [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(1): 537-548.
- [16] HALL E T. A system for the notation of proxemic behavior[J]. American Anthropologist, 1963, 65(5): 1003-1026.
- [17] HERRERA D, ROBERTI F, TOIBERO M, et al. Human interaction dynamics for its use in mobile robotics: Impedance control for leader-follower formation[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 696-703.
- [18] 彭建伟, 廖哲霖, 姚瀚晨, 等. 基于拓展社会力的机器人柔顺跟随与避障控制[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(8): 1776-1787.
- PENG J W, LIAO Z L, YAO H C, et al. A compliant robot control based on extended social-force model for human-following and obstacle avoidance[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(8): 1776-1787.
- [19] DIMEAS F, ASPRAGATHOS N. Online stability in human-robot cooperation with admittance control[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2016, 9(2): 267-278.
- [20] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [21] WANG P W, GAO S, LI L, et al. Obstacle avoidance path planning design for autonomous driving vehicles based on an improved artificial potential field algorithm[J]. Energies, 2019, 12(12). DOI: 10.3390/en12122342.
- [22] 姚瀚晨, 彭建伟, 戴厚德, 等. 基于改进弹簧模型的移动机器人柔顺跟随行人方法[J]. 机器人, 2021, 43(6): 684-693.
- YAO H C, PENG J W, DAI H D, et al. A compliant human following method for mobile robot based on an improved spring model[J]. Robot, 2021, 43(6): 684-693.
- [23] FAJEN B R, WARREN W H. Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection[J]. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2003, 29(2): 343-362.
- [24] TIAN H Y, MA X. Behavioral dynamics-based impedance control for collision avoidance of human-following robots[C]//IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 349-354.
- [25] KEEMINK A Q, VAN DER KOOIJ H, STIENEN A H. Admittance control for physical human-robot interaction[J]. International Journal of Robotics Research, 2018, 37(11): 1421-1444.
- [26] RIOS-MARTINEZ J, SPALANZANI A, LAUGIER C. From proxemics theory to socially-aware navigation: A survey[J]. International Journal of Social Robotics, 2015, 7: 137-153.
- [27] PRASSLER E, BANK D, KLUGE B. Motion coordination between a human and a mobile robot[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 1228-1233.
- [28] SEKIGUCHI S, YOROZU A, KUNO K, et al. Uncertainty-aware non-linear model predictive control for human-following companion robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 8316-8322.
- [29] ZHOU L, LI W. Adaptive artificial potential field approach for obstacle avoidance path planning[C]//7th International Symposium on Computational Intelligence and Design. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 429-432.

#### 作者简介:

廖哲霖 (1999 -), 男, 硕士生。研究领域: 移动机器人运动控制。

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。