文章编号:1671-4598(2023)04-0143-06 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2023.04.022 中图分类号:TP273 文献标识码:A

基于视觉图像的全向移动机器人轨迹 跟踪控制研究

察倍源¹、扬 瀚²

(1. 广西工业职业技术学院 智能制造学院,南宁 530001;2. 广西大学 电气工程学院,南宁 530004)

摘要:机器人轨迹节点跟踪比较难,导致机器人实际轨迹偏离期望轨迹,所以设计基于视觉图像的全向移动机器人轨迹跟踪控制方法;构建全向移动机器人的运动学数学模型,以此确定机器人移动轨迹数学模型;以移动轨迹数学模型为基础,按照视觉 图像划分标准对全向移动机器人运动图像的分割,通过分离目标节点的方式提取运动学特征参量,完成机器人轨迹节点跟踪处 理;结合节点跟踪处理结果,将运动学不等式与误差向量作为机器人轨迹跟踪控制的约束条件,利用滑模变结构搭建轨迹跟踪控 制模型,实现全向移动机器人轨迹跟踪控制;对比实验结果表明,所设计的方法应用后,全向移动机器人角速度曲线、线速度曲 线与期望运动轨迹曲线之间的贴合程度均超过90%,满足全向移动机器人轨迹跟踪控制要求。

关键词:视觉图像;全向移动机器人;轨迹跟踪;轨迹控制;滑模变结构;运动特征

Research on Omnidirectional Mobile Robot Trajectory Tracking Control Based on Visual Image

LIANG Beiyuan¹, YANG Han²

(1. Intelligent Manufacturing College, Guangxi Industrial Vocational and Technical College, Nanning 530001, China;
2. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: It is difficult to track the trajectory node of a robot, which leads to the deviation between actual trajectory and desired trajectory. Therefore, an omnidirectional mobile robot trajectory tracking control method based on visual image is designed. The kinematics mathematical model of the omnidirectional mobile robot is constructed to determine the mathematical model of the robot's moving trajectory. Based on the mathematical model of the moving track, the moving image of the omnidirectional mobile robot is segmented by the visual image division standard, and the kinematics characteristic parameters are extracted by separating the target nodes to complete the tracking process of the robot's track nodes. Combined with the node tracking results, the kinematics inequality and error vector are taken as the constraint conditions of the robot trajectory tracking control, and a sliding mode variable structure is used to build the trajectory tracking control model, and realize the trajectory tracking control of the omnidirectional mobile robot. The experimental results show that the application of the proposed method is applied, the fitting degree between the angular velocity curve, linear velocity curve and the desired trajectory curve of the omnidirectional mobile robot is more than 90%, which meets the trajectory tracking control requirements of the omnidirectional mobile robot.

Keywords: visual image; omnidirectional mobile robot; trajectory tracking; trajectory control; sliding mode variable structure; motion characteristics

0 引言

视觉图像技术具有效率和准确性高、鲁棒性强的特点, 在跟踪目标对象行进轨迹时能够得到更加稳定且可靠的识 别结果。其中,效率高表现在控制系统可以对目标节点进 行连续跟踪,所得图像更符合人眼视觉标准,故而在图像 帧采集方面的运行速率远高于其他类型的系统¹¹。准确性 高则是指利用视觉图像技术所采集到的跟踪图像始终具有 较高的精度水平,随着目标对象运动范围的扩大,跟踪误 报率与错报率指标的值不会发生显著变化。鲁棒性强是指 目标跟踪过程相对稳定,即便是在外界环境较为复杂的跟 踪环境下,视觉图像技术依然能够对目标对象行进节点进 行准确标注,不但解决了因图像模糊而造成的跟踪失准问

收稿日期:2022-08-25; 修回日期:2022-12-19。

基金项目:2020年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2020KY39012)。

作者简介:梁倍源(1980-),男,广西南宁人,大学本科,工程师,主要从事机器人视觉、机电一体化方向的研究。

引用格式:梁倍源,杨 瀚.基于视觉图像的全向移动机器人轨迹跟踪控制研究[J].计算机测量与控制,2023,31(4):143-148.

题,还可以最大程度上保障所得图像的真实性,为目标图像的后续加工与处理提供了便利^[2]。

移动机器人是一种自动化机器装置,既能够接受主机 的指挥与控制,也可以自主运行预先编排好的程序,在特 定工作环境下若控制主机中寄存了自动判别指令,移动机 器人则可以根据外界环境的具体情况,自主执行后续任 务^[3]。全向移动机器人是一种特殊的移动机器人设备,由 于其运动方式不受到外界环境的影响,故而其运动位移可 能覆盖当前空间环境中的所有行进方向。由于实际运动环 境与理想化环境不可能完全相同,所以机器人实际轨迹曲 线也就不能与期望轨迹曲线完全贴合。

针对这一问题, 文献 [4] 提出基于 Udwadia-Kalaba 轨迹跟踪控制方法, 该方法根据牛顿力学求解机器人运动 表达式, 又通过分解控制力矩的方式, 实现对机器人轨迹 节点的约束与跟踪控制。文献 [5] 提出了一种基于 backstepping 方法的移动机器人轨迹跟踪控制方法。该方法主要 利用牛顿一欧拉公式对于机器人动力学进行了建模分析, 并对所构建的动力学模型进行解耦处理, 利用 backstepping 方法对于机器人进行跟踪与控制。文献 [6] 提出了一种基 于萤火虫算法的移动机器人最优轨迹跟踪控制方法。该方 法利用相关参数搭建移动机器人运动学模型, 并结合机器 人位置与姿态方程设置避障路径跟踪的目标函数, 利用萤 火虫算法对目标函数进行优化求解, 利用 PD 控制律实现移 动机器人跟踪可控制。

然而上述方法并不能完全符合准确跟踪机器人轨迹节 点的实际应用需求,无法将实际轨迹曲线与期望轨迹曲线 间的拟合误差控制在既定数值标准之内。为解决该问题, 设计基于视觉图像的全向移动机器人轨迹跟踪控制方法。

1 机器人移动轨迹的数学模型

为实现对全向移动机器人轨迹的跟踪与控制,可以根 据滑模变结构控制原理,求解运动学与动力学数学模型, 本章节将针对这一内容展开研究。

运动学数学模型能够满足全向移动机器人轨迹节点的 运动学规律,参考滑模变结构的控制作用原理,则可认为 在单一轨迹曲线内,确保各个坐标轴夹角数值都不超过 $\frac{\pi}{2}$,才有可能将跟踪控制节点连接成一条平滑曲线。由于 全向移动机器人运动轨迹在横轴、纵轴、空间轴方向上均 存在节点分量,所以在建立运动学数学模型时,应对三类 空间向量进行同时取值^[7-8]。在机器人运动坐标系 O_{XYZ} 内, φ_x 表示轨迹节点 $\varphi = X$ 轴正方向的物理夹角, φ_y 表示节点 φ 与 Y 轴正方向的物理夹角, φ_z 表示节点 $\varphi = Z$ 轴正方向的物 理夹角,且 φ_x , φ_y , $\varphi_z \in (0, \frac{\pi}{2}]$ 的条件恒成立。设 χ 表示机 器人运动轨迹节点的全向布局系数, \vec{x} 表示全向移动机器人 轨迹路线的 X 轴运动学分量, \vec{y} 表示机器人轨迹路线的 Y 轴 运动学分量, \vec{z} 表示机器人轨迹路线的 Z 轴运动学分量。则可 将全向移动机器人的运动学数学模型表示为:

$$\vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{bmatrix} = \frac{Z(\alpha)}{\chi^2} \begin{bmatrix} \vec{x} \\ \vec{y} \\ \vec{z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin\varphi_x \\ \sin\varphi_y \\ \sin\varphi_z \end{bmatrix}$$
(1)

由于全向移动机器人运动行为具有多样性,所以运动 学数学模型的求解数值也并不唯一,但同一类运动行为所 对应的数学模型求解结果则完全相等。

动力学数学模型总结了全向移动机器人轨迹节点的动 力学规律,由于机器人轨迹节点排列状态受到内部参数摄 动行为、外部参数扰动行为的共同影响,所以只依靠运动 力矩来判断轨迹跟踪指令的可靠性就显得过于片面,故而 为实现对全向移动机器人轨迹的精准跟踪与控制,还应在 运动学数学模型的基础上,确定动力学期望速度^[9]。为使 全向移动机器人的运动稳定性得到保障,要求电机设备的 实际转速水平不得超过其预期转速数值。设 φ'_x 表示动力学 向量与X 轴正方向的物理夹角, φ'_x 表示动力学向量与Y 轴 正方向的物理夹角, φ'_x 表示动力学向量与Z 轴正方向的物 理夹角, $\vec{x'}$ 表示动力学期望速度的X 轴分量, $\vec{y'}$ 表示动力学 期望速度的Y 轴分量, $\vec{z'}$ 表示动力学期望速度的Z 轴分量, δ 表示电机设备的实际转速数值,联立式(1),可将全向移 动机器人的动力学数学模型表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}' \\ \dot{Y}' \\ \dot{Z}' \end{bmatrix} = \frac{Z(\alpha)}{(\delta-1)^{z}} \begin{bmatrix} \vec{x}' \\ \vec{y} \\ \vec{z}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin\varphi'_{x} \\ \sin\varphi'_{y} \\ \sin\varphi'_{z} \end{bmatrix}$$
(2)

相较于运动学数学模型,动力学数学模型间接影响了 全向移动机器人的运动行为,在对轨迹节点进行跟踪与控 制时,可以通过控制电机设备转速水平的方式使整条运动 轨迹保持相对平滑的状态^[10]。

2 基于视觉图像的机器人轨迹节点跟踪

在机器人移动轨迹数学模型的基础上,为实现对轨迹 节点的实时跟踪与控制,还需按照运动图像分割、目标节 点分离、运动特征提取的处理流程,完成对全向移动机器 人运动视觉图像的分析与研究。

2.1 运动图像分割

运动图像分割就是将一个完整且连续的全向移动机器 人运动图像划分成多个独立但不连贯的次级图像,但出于 完整性考虑,要求分割后图像必须能够准确反映出全向移 动机器人的轨迹运动趋势^[11]。

受电机设备动力学期望速度指标的影响,分割全向移动机器人运动图像时,要求机器人所处运动环境及运动学数学模型、动力学数学模型表达式取值均不能发生变化^[12]。 假设机器人运动坐标系为 O_{XY2} ,ε表示图像分割权重指标, \tilde{v} 表示单一轨迹路径内的线速度参考向量,且 $\tilde{v} \neq 0$ 的不等式条件恒成立, ΔV 表示线速度指标的单位累积量。在上述物理量的支持下,联立式(1)、式(2),可将全向移动机器人运动图像的分割目标函数C定义为:

$$C = \tilde{v} \mid \Delta V \mid^{2} - \lim_{e \to \infty} \left[\varphi \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} + \gamma \begin{bmatrix} \dot{X}' \\ \dot{Y}' \\ \dot{Z}' \end{bmatrix} \right]$$
(3)

式中, φ 表示轨迹线速度的运动学跟踪向量, γ 表示轨迹线速 度的动力学跟踪向量。为使机器人运动轨迹不发生明显偏 移, $\varphi > 0$ 、 $\gamma > 0$ 的不等式条件同时成立,且当 $\varphi = \gamma$ 时, 表示机器人运动轨迹的运动学分量与动力学分量完全相等。

2.2 目标节点分离

跟踪全向移动机器人轨迹路径时,保证主机所掌握的 视觉图像是完整的,虽然经过分割处理后轨迹运动趋势能 够表现得更加明显,但在图像样本相对比较稀疏的情况下, 密集排列的轨迹节点极易出现相互覆盖或遮挡的问题,这 就会造成控制主机的辨别困难,从而使得轨迹跟踪的准确 性受到影响^[13]。目标节点分离也叫目标样本分离,在分离 处理原则的作用下,密集排列区域内的重复覆盖节点可以 被筛选出来,控制主机可以利用这些筛选出来的节点对象建 立一个独立的样本集合,一方面可以保证全向移动机器人原 始运动图像的完整性,另一方面也可以突出密集排列区域内 轨迹节点参量的分布特征,从而实现对机器人轨迹节点的准 确跟踪与控制^[14]。设A表示机器人运动图像的分割次数,其 取值范围是(1.e),m表示轨迹节点提取特征,κ表示轨迹节 点的密集性度量系数,λ表示节点分离标准参量。全向移动机 器人轨迹目标节点的分离目标函数 B满足式(4):

$$B = \begin{cases} \kappa m \, \frac{A \cdot C}{\lambda}, & A > e \\ \ln \frac{\lambda AC}{\kappa m}, & 1 < A < e \end{cases}$$
(4)

分离目标节点对象时,要求全向移动机器人轨迹核心 标记点所处位置不能发生改变。

2.3 运动特征提取

运动特征影响全向移动机器人轨迹节点的排列形式。 在处理视觉图像时,控制主机可以根据运动特征提取表达 式判断机器人的实际运动状态,当既定区域内的目标节点 完全分离后,运动特征参量的累积形式直接决定了主机元 件对轨迹节点对象的跟踪与控制能力^[15-16]。设 ρ 表示分离区 域内目标节点的分布密度, ι_{κ} 表示两个随机选取的视觉图 像划分权值,且 $\iota \neq \kappa$ 的不等式条件恒成立, d_{ϵ} 表示机器人 运动轨迹标记特征, d_{κ} 表示机器人运动轨迹标记特征, ΔD 表示控制主机在单位时间内所能跟踪处理的机器人运动轨 迹节点累积总量, μ 表示运动轨迹路径内的跟踪向量,联立 上述物理量,可将基于视觉图像的全向移动机器人轨迹运 动特征提取结果 S 表示为:

$$S = \frac{\sqrt{\rho \cdot B}}{\sum d_{\iota}^{2} - d_{\kappa}^{2}}$$
(5)

由于权值指标 ₄、权值指标 _k的取值恒不相等,所以特征 值 d_e 与 d_e 的取值也不可能相等。

3 机器人轨迹跟踪控制

运动学不等式可以理解为控制主机对全向移动机器人 轨迹跟踪节点的近似性约束条件,由于全向移动机器人的 运动方向并不固定,所以动力学作用表达式的约束能力并 不十分清晰。在视觉图像中,全向移动机器人轨迹的分布 状态并不是完全规则的直线,所以不等式条件并不会对轨 迹节点的跟踪与控制结果造成影响^[17-18]。设 $k_1,k_2,...,k_n$ 表 示机器人运动轨迹内n个不重合也不为零的点位控制向量, θ 表示视觉图像中全向移动机器人的运动转向条件, \hat{h} 表示 运动学控制特征。控制主机对于全向移动机器人轨迹跟踪 节点的运动学不等式约束条件参量 F 如下:

$$F \approx \frac{|G_1 + G_2|^2}{\theta \cdot \hat{h}} \ln \frac{1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 + \dots + k_n^2}}$$
(6)

式中, G₁ 表示前馈控制器, G₂ 表示扰动观测器。构建运动学 不等式条件时,除了要求轨迹跟踪节点处于同一图像平面 之内,还应控制轨迹路径的偏移程度,使其端节点不超出 前馈控制器与扰动观测器的最远控制范围。

前馈控制器是一个完整的闭环结构,可以在已获取的 全向移动机器人运动视觉图像中,调节轨迹节点的排列状态,从而使得控制主机所制定轨迹跟踪计划能够符合全向 移动机器人的运动规律。在前馈控制器闭环内,控制主机 对于机器人轨迹节点的跟踪,要求目标节点分离区域与运 动特征提取区域必须为同一运动区域^[19]。一般情况下规定 转向度量指标的最小取值只能等于 1,当其取得最小值时, 表示当前情况下前馈控制器闭环对于机器人轨迹节点的跟 踪能力较弱,随着度量指标取值的增大,前馈控制器闭环 对于轨迹节点的跟踪能力也会不断增强^[20]。G₁的计算公式 如下:

$$G_{1} = f_{1}S + \bar{\omega}_{1} \int_{\nu=1}^{+\infty} g_{\nu}$$
(7)

式中, f₁ 表示前馈调节系数, $\bar{\omega}_1$ 表示机器人运动轨迹节点偏 离度, ν 表示转向度量指标, g₂ 表示轨迹跟踪控制特征。

扰动观测器 G₂ 在前馈控制器闭环的基础上,调节机器 人运动视觉图像中轨迹密集区域内的跟踪节点,使得控制 主机能够准确推断出全向移动机器人的运动状态,避免不 良跟踪行为的出现^[21-22]。在机器人运动视觉图像中,扰动 观测器闭环可以直接控制的轨迹区域相对有限,所以在定 义扰动观测器闭环的作用表达式时,要求机器人在单一运 动轨迹内的运动转向幅度不宜过大。G₂的计算公式如下:

$$G_2 = g_{\nu} \cdot \frac{f_2 S}{\bar{\omega}_2} \tag{8}$$

式中, *f*₂ 表示基于视觉图像技术的机器人轨迹节点扰动调节 系数, *ū*₂ 表示运动轨迹路径内的跟踪节点布局系数。

在轨迹跟踪控制特征参量取值保持恒定的情况下,控制主机可以根据扰动观测器作用表达式,调节视觉图像中待跟踪轨迹节点的分布形式。

误差向量影响主机元件对全向移动机器人轨迹跟踪节

点的控制准确性,在同一视觉图像内运动坐标表达式保持 不变的情况下,误差向量指标的取值越趋近自然数零,就 表示主机元件对全向移动机器人轨迹跟踪节点的准确控制 能力越强^[23-24]。若视觉图像中所包含轨迹跟踪节点的数量 值足够大,则可认为在当前情况下,所求得的每一个误差 向量指标都对应唯一一个跟踪节点控制准确性标准条件。 误差向量 L 满足式(9):

$$\boldsymbol{L} = F^{-1} \times \left(1 - \dot{p} \left| \frac{\vartheta j}{J} \right|^2 \right) \sin \omega \tag{9}$$

其中: *p* 表示机器人运动轨迹的跟踪节点控制特征, *j* 表示视觉图像内的机器人轨迹节点转向向量, *g* 表示转向角偏 离系数, ω 表示核心转向角, *j* 表示控制主机对机器人轨迹 跟踪节点排列误差的容限能力。由于机器人实际轨迹曲线 不能与期望轨迹曲线完全贴合,所以误差向量指标的求解 结果不可能等于零。根据误差向量指标的具体数值对主机 元件的控制作用能力进行调节,从而实现全向移动机器人 轨迹跟踪控制。

结合全向移动机器人轨迹跟踪控制的约束条件,利用 滑模变结构设计全向移动机器人轨迹跟踪控制模型,以此 保证跟踪控制精度与效率。

滑模变结构控制作用意在协调机器人移动方向与轨迹 方向之间的变量关系,可以根据轨迹点附着状态,确定与 控制全向移动机器人的实际运动方向。图1反映了滑模面 控制点的选取原则。



图 1 滑模面三类控制点

若移动方向与轨迹跟踪方向相对,则表示机器人运动 方向与滑模变结构主控制方向相同;若轨迹跟踪方向与移 动方向首尾相接,则表示机器人运动方向与滑模变结构主 控制方向相反;若移动方向与轨迹跟踪方向首尾相接,则 表示机器人运动方向平行于滑模变结构主控制方向。

假设 α 表示一个随机选取的轨迹节点标记参量,且 $\alpha \neq$ 0 的不等式条件恒成立, β 表示滑模变结构表面的节点排列 系数,联立上述物理量,基于滑模变结构的全向移动机器 人轨迹跟踪控制模型表达式定义为:

$$Z(\alpha) = \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta}\alpha^2 + L_{\min}}}{F}$$
(10)

- 4 实例分析
- 4.1 图像处理

设置多个监测摄像头跟踪机器人轨迹节点的运动路径, 将摄像头设备所采集到的轨迹运动数据回传至 Dali Master 软件,使其能够对机器人实验对象在既定时间内的运动轨 迹进行准确分析。利用 Dali Master 软件,截取完整的机器 人运动图像,如图2所示。



图 2 全向移动机器人运动图像

本次实验所选设备元件的具体型号参考表1。

表1 实验设备选型

实验设备	名称型号
监测摄像头	IMX322 1080P 低照度摄像头
全向移动机器人	DEEBOT T5 机器人
处理软件	Dali Master 软件
轨迹跟踪器	EV14 跟踪设备
信号触发器	GS-TB02 设备
转向控制器	DVM24S04 元件
电力驱动器	LED5000PHR 直流电源
电动机	ZF 同步电动机
滤波器	YB410-6A引线式设备

为避免不公平实验结果的出现,基于视觉图像的控制 方法、基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法所用实验设备型号 完全一致。

4.2 实验原理与实验步骤

全向移动机器人实际轨迹曲线与期望轨迹曲线之间的 贴合程度,能够反映出运动学控制器对机器人轨迹节点的 跟踪准确性,若机器人运动行为不会因外界干扰而出现中 断现象,则可认为实际轨迹曲线与期望轨迹曲线之间的贴 合程度越大,就表示机器人轨迹节点的准确跟踪能力越强。

机器人实际轨迹曲线与其期望轨迹曲线之间的贴合度 求解表达式为:

$$\begin{cases} \nu_{\max} = \frac{|\Delta W_{\max}|}{W_{\max}} \times 100\% \\ \nu_{\min} = \frac{|\Delta W_{\min}|}{W_{\min}} \times 100\% \end{cases}$$
(11)

式中, v_{max} 与 v_{min} 分别表示贴合度的最大值与最小值, W_{max} 表示期望轨迹曲线极大值, ΔW_{max} 表示实际轨迹曲线极大值与 期望轨迹曲线极大值之间的数值差, W_{min} 表示期望轨迹曲线 极小值, ΔW_{min} 表示实际轨迹曲线极小值与期望轨迹曲线极 小值之间的数值差。

实验过程中,利用基于视觉图像的跟踪控制方法以及

基于 Udwadia-Kalaba 的轨迹跟踪控制方法作为实验对比方法,将不方法应用后的轨迹曲线与期望轨迹曲线进行对比,总结实验规律。

具体的实验步骤如下:

设置监测摄像头采样时间为1ms,从上位机发送控制 指令给信号触发器,信号触发器发出指令后,控制主机对 全向移动机器人的电力驱动器、电动机、转向控制器进行 控制,利用处理软件相关获取机器人运动图像数据,将滤 波器滤波处理后数据的实时信息反馈回PC上位机,形成控 制回路以完成控制指令,以此实现全向移动机器人跟踪 控制。

4.3 结果分析

对于全向移动机器人而言,其轨迹曲线包括角速度曲线、线速度曲线两部分,具体实验图像如图3、图4所示。



分析图 3 可知,机器人角速度期望轨迹曲线保持先来 回波动、再趋于稳定的数值变化状态,最大角速度值为 12.01 rad/s、最小角速度值为 6.99 rad/s。基于视觉图像的 控制方法角速度轨迹曲线的变化态势与期望轨迹曲线保持一 致,最大角速度值为 11.99 rad/s、最小角速度值为 6.87 rad/s。 基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法角速度轨迹曲线的变化态 势与期望轨迹曲线保持一致,最大角速度值为 13.36 rad/s、 最小角速度值为 8.39 rad/s。联立式(11),基于视觉图像的 控制方法、基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法的角速度轨迹曲 线贴合度进行计算,结果为:基于视觉图像的控制方法的 v_{max} 值为 0.2%、基于视觉图像的控制方法的 v_{min} 值为 1.7%; 基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法的 v_{min} 值为 10.1%、基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法的 v_{min} 值为 10.1%、基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法的 v_{min} 值为 20.0%,基于视觉 图像的控制方法的角速度轨迹曲线贴合度明显低于基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法。

分析图 4 可知,机器人线速度期望轨迹曲线也保持先 来回波动、再趋于稳定的数值变化状态,最大线速度值为 6.00 m/s、最小线速度值为 3.23 m/s。基于视觉图像的控 制方法的线速度曲线的变化态势与期望轨迹曲线保持一致, 最大线速度值为 5.82 m/s、最小线速度值为 2.97 m/s。基 于 Udwadia-Kalaba 的控制方法的线速度曲线的变化态势与





期望轨迹曲线保持一致,最大线速度值为 6.41 m/s、最小 线速度值为 1.22 m/s。联立式 (11),对基于视觉图像的控 制方法、基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法线速度轨迹曲线 贴合度进行计算,结果为:基于视觉图像的控制方法的 v_{max} 值为 3.00%、基于视觉图像的控制方法的 v_{min} 值为 8.0%; 基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法的 v_{max} 值为 6.9%、基于 Udwadia-Kalaba 的控制方法的 v_{min} 值为 62.2%。

综上可知,在基于视觉图像的跟踪控制算法的作用下, 全向移动机器人实际轨迹曲线与期望轨迹曲线呈现出更加 贴合的状态,在增强运动学控制器对机器人轨迹节点的准 确跟踪方面能够起到促进作用。

5 结束语

本文以视觉图像技术为基础,求解运动学表达式,又 通过分离目标节点的方式,完成对机器人运动特征的提取, 在前馈控制器闭环、扰动观测器闭环的作用下,利用运动 学不等式条件获取约束误差向量指标的取值结果,以此实 现全向移动机器人轨迹跟踪控制。实验结果表明,该方法 不但可以使机器人实际轨迹曲线与期望轨迹曲线更加准确 地贴合在一起,还能够增强运动学控制器对机器人轨迹节 点的跟踪准确性,满足实际应用需求。

参考文献:

- [1] 崔晓荣,沈 涛,黄建鲁,等.基于 BEMD 改进的视觉显著性 红外和可见光图像融合 [J]. 红外技术,2020,42 (11):1061 -1071.
- [2] 李中益,杨观赐,李 杨,等. 基于图像语义的服务机器人视觉隐私行为识别与保护系统 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2020,32 (10): 1679-1687.
- [3] 贾松敏, 卢兴阳, 张祥银, 等. 轮子打滑状态下全向移动机器 人轨迹 跟踪 控制 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (4): 833 -842.
- [4] 董方方,金 栋,赵晓敏,等. 基于 Udwadia-Kalaba 方法的全向移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(1):7-12.
- [5]陈 滢,陈 炜,杨贺贺,等.基于 backstepping 方法的两轮

移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. 天津理工大学学报, 2021, 37 (3): 1-7.

- [6] 丁 力,吴洪涛,李兴成,等.移动机器人的最优轨迹跟踪控 制研究 [J]. 机械设计与制造, 2020 (2): 271-274.
- [7] 刘 卓, 连宾宾, 李 祺. 基于有限和瞬时旋量理论的 Exechon 并联机器人运动学分析 [J]. 工程设计学报, 2020, 27 (3): 357-363.
- [8] 闫辉垠,李传扬,郭宏伟,等. 面向空间应用的 3-R (SRS) RP多环机构操作臂结构设计及逆运动学分析 [J]. 机械工程 学报,2021,57 (7):1-9.
- [9] 刘广军, 刘可臻, 孙 波, 等. 基于刚-柔耦合的反铲液压挖掘 机工作装置多体动力学分析与仿真 [J]. 同济大学学报(自然 科学版), 2021, 49 (7): 1053-1060.
- [10] 钟 阳, 王良明, 吴映锋. 基于计算流体力学与刚体动力学耦 合的高速旋转弹丸弹道计算方法 [J]. 兵工学报, 2020, 41 (6): 1085 - 1095.
- [11] 周宏宇, 严春峰, 宋 旭, 等. 基于加权三视角运动历史图像 与时序分割的动作识别算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34 (11): 194-203.
- [12] 孔祥魁, 樊翠红. 多特征融合和最小二乘支持向量机的运动 视频图像分类研究 [J]. 南京理工大学学报, 2022, 46 (2): 164 - 169.
- [13] 周荣艳, 陈建峰, 李晓强, 等. 基于目标高斯分布的定位系统 节点最优部署方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (7): 1791-1796.
- [14] 刘 青, 查虹丽, 马龙雄, 等. 采用多目标离散粒子群算法的 地磁感应电流抑制措施的优化和效果评价 [J]. 西安交通大 学学报,2021,55 (3):90-98.
- [15] 欧先锋,晏鹏程,王汉谱,等.基于深度帧差卷积神经网络的 运动目标检测方法研究 [J]. 电子学报, 2020, 48 (12): 2384 - 2393.
- (上接第75页) [8] 苏靖涵,张 潇. 基于深度迁移自编码器的变工况下滚动轴承
- 故障诊断方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (7): 85-90, 99.
- [9] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks [J]. Science, 2006, 313 (5786): 504 - 507.
- [10] 赵志宏,李乐豪,杨绍普,等.一种频域特征提取自编码器 及其在故障诊断中的应用研究 [J]. 中国机械工程, 2021, 32 (20): 2468-2474.
- [11] GUITTON A. Blocky regularization schemes for full-waveform inversion [J]. Geophysical Prospecting, 2012, 60 (5): 870 -884.
- [12] BENGIO Y. Learning deep architectures for AI [J]. Foundations and Trends in Machine Learning, 2009, 2 (1): 1-131.
- [13] 袁非牛,章 琳,史劲亭,等. 自编码神经网络理论及应用 综述 [J]. 计算机学报, 2019, 42 (1): 203-230.
- [14] KINGMA D P, WELLING M. Auto-encoding variational Bayes

- [16] 刘 峰,徐 壮,干宗良,等.一种基于时序运动特征的 RGB-D视频跌倒行为检测算法 [J]. 南京邮电大学学报(自 然科学版), 2020, 40 (5): 117-124.
- [17]张 卉,朱永飞,刘雪飞,等.基于模糊迭代Q-学习的冶金 工业机器人轨迹跟踪控制研究 [J]. 工程设计学报, 2022, 29 (5): 564 - 571.
- [18] 张 磊, 鲁 凯, 高春侠, 等. 基于变增益自抗扰技术的机 器人轨迹跟踪控制方法 [J]. 电子学报, 2022, 50 (1): 89 - 97
- [19] KHAN S, GUIVANT J, LI X. Design and experimental validation of a robust model predictive control for the optimal trajectory tracking of a small-scale autonomous bulldozer [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 147 (1): 103903 -103916.
- [20] 赵文广,张 兴,李彦君,等.基于电压与功率前馈的电能路 由器储能端口优化控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (9): 179-186.
- [21] 刘鑫蕊, 高 超, 王智良. 基于非线性扰动观测器的光伏并网 逆变器直流侧母线电压控制 [J]. 电网技术, 2020, 44 (3): 897 - 906.
- [22] 尹忠刚, 靳海旭, 张彦平, 等. 基于扰动观测器的交流伺服系 统低速爬行滤波反步控制方法 [J]. 电工技术学报, 2020, 35 (S1): 203-211.
- [23] KUBO R, FUJII Y, NAKAMURA H. Control Lyapunov function design for trajectory tracking problems of wheeled mobile robot - science direct [J]. IFAC-Papers On Line, 2020, 53 (2): 6177-6182.
- [24] FARNANE A E, YOUSSEFI M A, MOUHSEN A, et al. Trajectory tracking of autonomous driving tricycle robot with fuzzy control [J]. International review of automatic control, 2022, 15 (2): 80-86.
- [C] //International Conference on Learning Representations, ICLR 2014, Banff, 2014.
- [15] LEIBLER S. On information and sufficiency [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1951, 22 (1): 79-86.
- [16] HAN J W, KAMBER M, HAN J W, 等. 数据挖掘概念与技 术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [17] 刘财辉, 刘地金. 离群点检测的邻近性方法综述 [J]. 计算 机工程与应用, 2022, 58 (21): 1-12.
- [18] 石玉亮, 王 呈. 基于 Pearson-LOF 算法的梯联网数据采集 端异常帧检测 [J]. 控制工程, 2022, 29 (8): 1457-1463.
- [19] ABUZAID A H. Identifying density-based local outliers in medical multivariate circular data [J]. Statistics in medicine, 2020, 39 (21).
- [20] WADE, A, SMITH, et al. Rolling element bearing diagnostics using the case western reserve university data: a benchmark study [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 64-65, 100-131.