

基于引力势场的包装机器人自动避障控制方法

党霞

(河南工业贸易职业学院, 郑州 450000)

摘要: **目的** 为解决自动化包装机器人机械手受到障碍物影响导致避障效果较低的问题, 提出自动化包装机器人机械手自主避障方法。**方法** 建立自动化包装机器人行走轨迹运动模型, 计算其线速度和角速度, 完成自动化包装机器人的运动学分析; 利用相邻2个自动化包装机器人之间的引力势场, 计算自动化包装机器人所受的合力; 设置自动化包装机器人机械手自主避障的状态方程, 设计自主避障算法; 结合自主避障流程, 实现自动化包装机器人机械手的自主避障。**结果** 在U型障碍物路段和H型障碍物路段中设计了对比实验, 实验结果表明, 提出的自主避障方法无论在何种类型路段, 自动化机器人的工作效率都在75%以上, 具有较好的避障效果。**结论** 适用于自动化包装机器人的机械手避障, 为自动化包装机器人的研究提供参考。

关键词: 自动化; 包装机器人; 机械手; 自主避障

中图分类号: TB486; TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)21-0254-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.21.035

Automatic Obstacle Avoidance Control Method of Packaging Robot Based on Gravitational Potential Field

DANG Xia

(Henan Industry and Trade Vocational College, Zhengzhou 450000, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an autonomous obstacle avoidance control method for automatic packaging robot manipulator in order to solve the problem of low obstacle avoidance effect caused by the influence of obstacles. The motion model of automatic packaging robot was established, and its linear velocity and angular velocity were calculated. Then, the kinematic analysis of the robot was completed. The resultant force of the robot was calculated by the gravitational potential field between two adjacent automatic packaging robots. The state equation of autonomous obstacle avoidance of the robot manipulator was set up to design the autonomous obstacle avoidance algorithm. Combined with the autonomous obstacle avoidance process, the automatic packaging robot manipulator realized the autonomous obstacle avoidance. A comparative experiment was designed in U-shaped obstacle section or H-type obstacle road section. According to the experimental results, the working efficiency of the automatic robot was more than 75% no matter in which type of road section, and the good obstacle avoidance effect was better. The obstacle avoidance method suitable for automatic packaging robot manipulator provides reference for the research of automatic packaging robot.

KEY WORDS: automatic; packaging robot; manipulator; autonomous obstacle avoidance

收稿日期: 2021-01-29

基金项目: 河南省教育厅项目 (ZJB19047)

作者简介: 党霞 (1980—), 女, 硕士, 河南工业贸易职业学院讲师, 主要研究方向为机电一体化。

人类逐渐依赖机器人来进行各种难以完成和实现的工作,包括危险性动作和复杂性动作,自动化机器人的自主避障研究和定位导航研究是自动化包装机器人领域中的重点研究方向^[1]。国外对于自动化机器人在智能控制方面的研究一直处于领先水平,第 1 台自动化包装机器人就是美国在 20 世纪 60 年代研制出来的,随后国外很多国家都开始关注自动化机器人的研究,然而最先进的研究领域就是自动化机器人的避障研究,这一研究的问世,大大提高了自动化机器人的工作效率^[2]。国内对于自动化机器人自主避障的研究起步比较晚,并且在发展过程中也比较缓慢,主要是由于国内有关自动化机器人的研究仅限于各大高校和科学研究院的研究,至今并未发展到企业的研制中,导致自动化机器人自主避障的研究不能引起人们的广泛关注^[3]。

于乃功等^[4]为解决非结构化环境中移动机器人的避障问题,将光流算法应用到移动机器人避障方法设计中,该避障方法可以使移动机器人在非结构化环境中实现无碰撞行走,但是由于光流算法自身的局限性,使得移动机器人在光源复杂的环境中的避障准确度较低。杨晶东等^[5]针对移动机器人在导航过程中受到过多寻求最优路径的影响,出现死锁或者震荡的现象,提出了将多目标优化应用到移动机器人避障算法设计中,该避障算法可以在鲁棒性的前提下,改善移动机器人避障导航的安全性,但是该方法由于在多目标优化时消耗过多的时间,使其虽然能安全避障,但是及时性较低。郑来芳等^[6]以光流密度作为使用避障的光源,结合光流和人工势场法,以光流法进行障碍物检测,人工势场法进行避障规划,提出一种局部路径规划的障碍物检测及避障方法,该方法虽在一定程度上实现了风管机器人的避障,但是仅限于风管机器人,实验结果较片面。陈至坤等^[7]在传统 HS 光流法的基础上提出了一种加快光流场计算的方法,并将 2 种算法应用到相同的避障系统中,该避障系统能更快地探测出机器人行驶前方的障碍物,但是避障准确率未知。刘欢等^[8]介绍了机器人 Q 学习避障算法的实现方法,并构建了仿真实验平台,模拟移动机器人在未知环境下自主、安全地从起始点到目标点的过程,但是该方法也存在避障及时性较低的问题。

基于以上背景,为了在自动化包装机器人生产过程中,提高其自主避障效果,降低客户在使用过程中的经济损失,文中设计一种自动化包装机器人机械手自主避障方法。为了描述自动化包装机器人的行走轨迹,建立运动模型;通过计算自动化包装机器人的线速度和角速度分析自动化包装机器人的运动规律,完成自动化包装机器人的运动学分析。利用相邻 2 个自动化包装机器人之间的引力势场,计算自动化包装机器人所受的合力;基于自动化包装机器人机械手自主避障的状态方程,设计自动化包装机器人机械手自主

避障算法;结合自动化包装机器人机械手的自主避障流程设计,实现自动化移动机器人机械手的自主避障,从而提高自动化包装机器人机械手的自主避障效果。

1 自动化包装机器人机械手自主避障方法设计

自动化包装机器人主要是针对食品、饮料、酒水、医药、化妆品、日化品、化工、农药、肥料、五金电器、电子等行业设计的一种工业机器人,其可以大大减少人工成本。文中主要研究自动化包装机器人机械手主动避障方法,因此在双轮差动驱动自动化包装机器人机械手见图 1。



图 1 自动化包装机器人机械手实物
Fig.1 Physical diagram of automatic packaging robot manipulator

1.1 自动化包装机器人的运动学分析

自动化包装机器人通常采用双轮差动驱动,通过控制机器人左侧驱动轮与右侧驱动轮之间的速度差,来实现自动化包装机器人的前进、倒退以及转弯等操作^[6]。为了描述差分驱动自动化包装机器人的行走轨迹,先分析其运动学特性,因此可以得到具有差分驱动机制的自动化包装机器人的运动模型,见图 2。

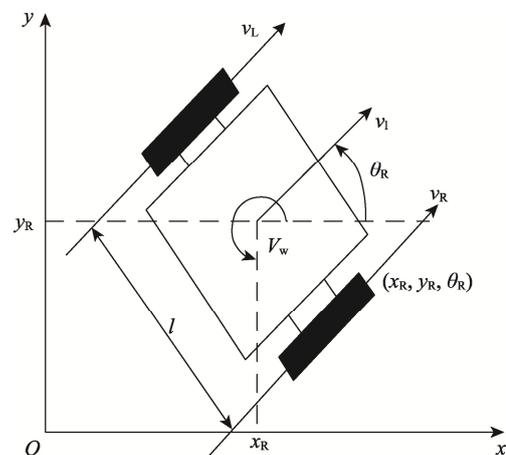


图 2 自动化包装机器人的运动模型
Fig.2 Motion model of automatic packaging robot

从自动化包装机器人的运动模型中可以看出,自动化包装机器人包括2个共轴的轮子,每个轮子都有一个独立的驱动电机, v_L 表示自动化包装机器人左轮的线速度, v_R 表示自动化包装机器人右轮的线速度, l 表示左轮和右轮的轴心距离, v_1 表示自动化包装机器人的线速度, v_w 表示自动化包装机器人的角速度, 因此可以得出:

$$v_1 = \frac{v_L + v_R}{2} \tag{1}$$

$$v_w = \frac{2(v_R - v_L)}{l} \tag{2}$$

根据式(2)的结论可以得到,当机器人左轮的线速度与机器人右轮的线速度相等时,机器人的角速度为0,这时自动化包装机器人就会做直线运动,当机器人左轮的正向线速度与机器人右轮的反向线速度相等时,机器人的线速度为0,这时自动化包装机器人就会在原地做旋转运动,旋转半径为0^[7]。

根据图1可知,自动化移动机器人的位置可以表示为 $(x_R(t), y_R(t))$, $\theta_R(t)$ 表示方向,那么机器人行走时的线速度为 $\dot{x}_R(t)$, $\dot{y}_R(t)$, 角速度为 $\dot{\theta}_R(t)$, 得到自动化包装机器人在行走时的速度矢量为:

$$\dot{\xi} = [\dot{x}_R(t) \quad \dot{y}_R(t) \quad \dot{\theta}_R(t)]^T \tag{3}$$

由式(3)可得:

$$v_L = \omega_L R, v_R = \omega_R R \tag{4}$$

自动化包装机器人行走时的质心运动方程为:

$$\dot{x}_R = v_1 \cos \theta_R, \dot{y}_R = v_1 \sin \theta_R, \dot{\theta}_R = v_w \tag{5}$$

综合式(4)和式(5)可以得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos \theta_R & \frac{R}{2} \cos \theta_R \\ \frac{R}{2} \sin \theta_R & \frac{R}{2} \sin \theta_R \\ \frac{R}{l} & \frac{R}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \tag{6}$$

为了使式(6)更简便,可以将式(6)中的2个控制变量用另外2个变量代替,得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & 0 \\ \sin \theta_R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_w \end{bmatrix} \tag{7}$$

通过以上对自动化包装机器人的运动学分析,可以确定自动化包装机器人的运动状态与2个轮子的速度有关,当有多个轮子的机器人做旋转运动时,必须具有一个旋转中心,将其定义为瞬间曲率中心^[8]。

为了描述自动化包装机器人的行走轨迹,建立了运动模型,通过计算自动化包装机器人的线速度和角速度,分析了自动化包装机器人的运动规律,研究自动化包装机器人的运动轨迹,为研究自动化包装机器人机械手自主避障奠定基础。

1.2 设计自动化包装机器人机械手自主避障算法

在自动化包装机器人的运动学分析基础上,在此基础上设计自动化包装机器人机械手自主避障算法。假设 α 表示相邻2个机器人 i 和 $i+1$ 的转角, $\Delta\alpha$ 表示转角差, $\Delta\alpha_1$ 表示转角差的额定最大值。当 $\Delta\alpha < \Delta\alpha_1$ 时,在自动化包装机器人上会产生引力场^[9], 相邻2个自动化包装机器人之间的引力势场表示为:

$$U_x(i, i+1) = \frac{1}{2} \beta \Delta\alpha^2 (\alpha_i, \alpha_{i+1}) \quad \Delta\alpha(\alpha_i, \alpha_{i+1}) < \Delta\alpha_1 \tag{8}$$

式中: β 为自动化包装机器人行走的正比例增益系数。那么对应的应力表示为:

$$F_x(i, i+1) = \beta(\alpha_i, \alpha_{i+1}) \tag{9}$$

经过一定改进之后,自动化包装机器人所受的合力为:

$$F_h(i) = F_x(i) + F_{rep}(i) + F_x(i, i+1) \tag{10}$$

式中: $F_{rep}(i)$ 为斥力。可见,自动化包装机器人的受力不仅包括斥力和引力,还包括相邻机器人的作用力,具有更强大的耦合性,因此,当机器人的一个手指发出动作之后,其他几个手指就可以跟随其发出相应的动作^[10]。将自动化包装机器人受到的合力看做主手指控制器的输入,使其他几个手指跟随其实现同步动作。根据自动化包装机器人的电压和电机力矩平衡方程^[11], 可以得到:

$$\begin{cases} U = rI + L \frac{dI}{dt} + E \\ E = cw \\ T - T_L = J \frac{dw}{dt} \\ T = kI \end{cases} \tag{11}$$

式中: U 为机械手的两端电压; r 为机械手回路的总电阻; L 为电感; w 为自动化包装机器人的转速; I 为回路电流; E 为电势; c 为机器人电压反馈系数; J 为转动惯量; k 为电磁力矩的系数; T_L 为负载产生的转矩; T 为机器人电机产生的转矩。当 $x_1 = \alpha, x_2 = w$ 时,可以得到自动化包装机器人机械手自主避障的状态方程,表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\beta x_2 + bu \end{cases} \tag{12}$$

式中: $b = k_u \frac{k}{JR}$; u 为自主避障输入。自动化机器人的自主避障可以根据人工势场来驱动,采用PID控制跟随误差^[12], 假设第 i 台自动化包装机器人的自主避障输入为:

$$U_{ii}(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_D \frac{de(t)}{dt} \tag{13}$$

式中: $e(t)$ 为自动化包装机器人的期望避障误

差,通过控制 $e(t)$ 得到机器人的期望输出值; k_p , k_i , k_d 分别为比例避障系数、积分避障系数和微分避障系数。

利用相邻 2 个自动化包装机器人之间的引力势场,计算了自动化包装机器人所受的合力,基于自动化包装机器人机械手自主避障的状态方程,设计了自动化包装机器人机械手自主避障算法,通过设计自动化包装机器人机械手自主避障流程,来实现自动化包装机器人机械手的自主避障。

1.3 设计自动化包装机器人机械手自主避障流程

在自动化包装机器人机械手自主避障流程设计中,定义包装机器人是一个半径为 R 的圆形^[13],并且行走过程中的路面是光滑的,将自动化包装机器人的行走动作命令定义为 $Action(\omega, v_m, w)$ 。其中 ω 为自动化包装机器人的转动角度, v_m 为机器人的行走速度, w 为包装机器人的转动速度。

首先,以自动化包装机器人中心,将圆形区域划分为 n 个扇形区域,每个区域的角度为 2.5° ,定义自动化包装机器人正对方向为第 0 个扇形区域,按照顺时针的方向开始逐渐增加,直到添加到最后一个扇形区域^[14]。如果其中一个扇形区域被选中,那么自动化包装机器人的转动角度为:

$$\omega = \text{tran}(s) = \begin{cases} s \times \mu & s \leq \frac{n}{2} \\ (s - n) \times \mu & s > \frac{n}{2} \end{cases} \quad (14)$$

当自动化包装机器人转动角度大于 0 时,说明自动化包装机器人顺时针转动 ω 度;当自动化包装机器人转动角度小于 0 时,说明自动化包装机器人逆时针转动 ω 度。

定义 L 为某一个障碍物的边缘点集合, $\lambda_i(L)$ 表示自动化包装机器人到障碍物的最短距离,当 $\lambda_i(L) = 0$ 时,说明扇形区域内没有障碍物。

最后引入一个判定值^[15],来判断自动化包装机器人从圆心到障碍物的接近度。

在定义包装机器人运动区域为圆形的基础上,利用相邻 2 个自动化包装机器人之间的引力势场,计算其所受的合力,设计了自动化包装机器人机械手的自主避障流程如下所述。

1) 先获取自动化包装机器人机械手的工作空间尺寸。

2) 分割机器人机械手的工作空间,将机器人机械手的工作空间分割成多个尺寸一致的离散单元,每个离散单元都具有唯一的编号。

3) 对处于每个位置的机械手,求解得到与其发生干涉的单元,将其写入单元所对应的储存空间中。

4) 步进自动化包装机器人机械手的关节值,使

机器人机械手处于新的位置,重复操作步骤 3,直到遍历所有的机械手关节值组合。

5) 获取障碍物的具体信息,找到障碍物所占据的工作空间离散单元。

6) 根据工作空间单元序号来进行检索,得到工作空间单元所对应的机械手关节值集合。

7) 运算机械手关节值集合,获得机械手在当前区域内的最优路径。

综上所述,先对自动化包装机器人进行了运动学分析,通过设计自动化包装机器人机械手自主避障算法,减弱了障碍物对机械手工作效率的影响,结合自主避障流程设计,实现了自动化移动机器人机械手的自主避障。

2 实验对比分析

将障碍物等效为轴截面,即为圆形的扇环,则关节角在工作范围内无论转至何位置,机械手所要翻越的障碍总是圆,因此,为了便于对实验过程描述,避障实验只需在与机械手初始状态共面的平面里进行,若抓取目标和障碍物在空间其他任意位置,仅需同步调整即可。此时,机械手所要翻越的障碍依然是平面圆。基于此,利用 Matlab 软件进行仿真分析。

具体仿真环境设置:以图 1 所示的自动化包装机器人机械手为研究对象,在直角坐标系下,机械手的起始点坐标为(0, 0.169, 0),目标点坐标为(0, 3.133, 0.569),步长为 0.5° ,设置机械手引力和斥力增益系数均为 1,分别利用文中方法、文献[4]方法和文献[5]方法在 U 型和 H 型障碍物路段进行对比测试。

以自动化包装机器人的工作效率和经济损失为测试指标,具体实验结果如下所述。

2.1 测试自动化包装机器人工作效率

分别将自动化包装机器人处于 U 型障碍物路段和 H 型障碍物路段,测试文中、文献[4]以及文献[5]提出的机械手自主避障方法,对自动化包装机器人工作效率的影响情况,每个路段设置 10 个障碍物,分别统计 3 种方法下自动化包装机器人包装 400 个同种类化妆品的工作效率,测试结果见图 3。

从图 3 的测试结果可以看出,在 U 型障碍物路段中,文中提出的机械手自主避障方法可以使自动化机器人的工作效率超过 80%,而文献[5]的机械手自主避障方法只可以控制自动化包装机器人的工作效率在 40%以上,最高也只有 85%,自动化包装机器人经过文献[4]的机械手自主避障方法处理之后,工作效率为 20%~58%。在 H 型障碍物路段中,提出的机械手自主避障方法得到的工作效率虽然没有 U 型障碍物路段高,但是依然可以将自动化包装机器人的工作效率控制在 75%以上,而采用文献[5]和文献[4]的机械手自主避障方法,自动化包装机器人的工作效率却

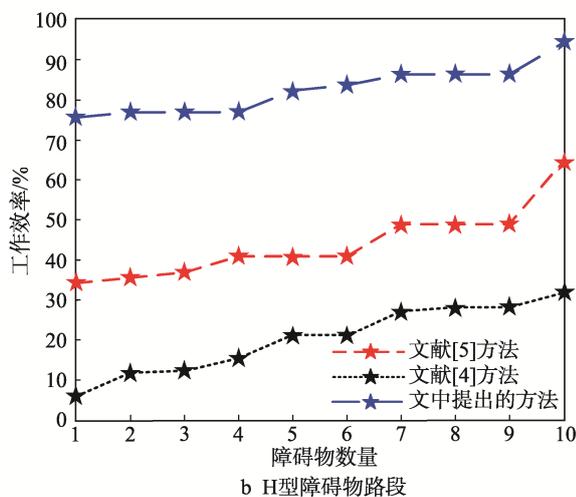
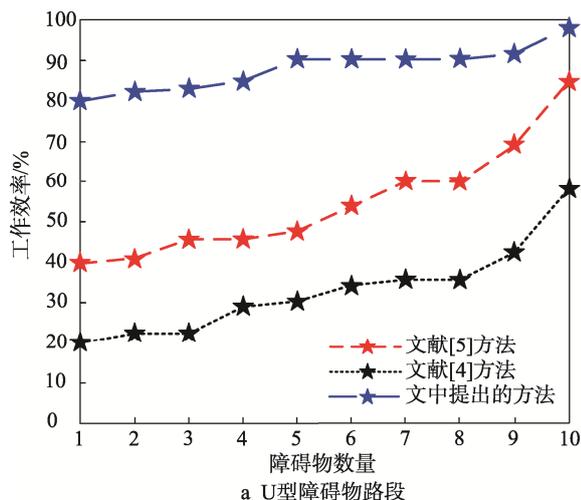


图3 自动化包装机器人工作效率测试结果
Fig.3 Test results of working efficiency of automatic packaging robot

降低了,说明文献[5]和文献[4]的机械手自主避障方法更适合在U型障碍物路段中工作。

2.2 测试自动化包装机器人经济损失

分别将自动化包装机器人处于U型障碍物路段和H型障碍物路段,由于不同障碍物路段会对自动化包装机器人的避障精度造成影响,难免因未及时避障造成经济损失,因此提出采用机械手自主避障方法、文献[4]的机械手自主避障方法以及文献[5]的机械手自主避障方法,测试自动化包装机器人在工作过程中的经济损失情况,经济损失计算见式(15)。

$$S = S_{\alpha} + S_{\beta} \tag{15}$$

式中: S 为总经济损失; S_{α} 为包装机器人直接碰到障碍物造成的直接经济损失; S_{β} 为包装机器人长时间损耗造成的间接经济损失,测试结果见图4。

从图4的测试结果可以看出,在U型障碍物路段中,提出的机械手自主避障方法在机器人工作过程中的经济损失最小,当障碍物的数量为7或8时,经济损失最大,达到了1.6万元,而其他2种自主避障

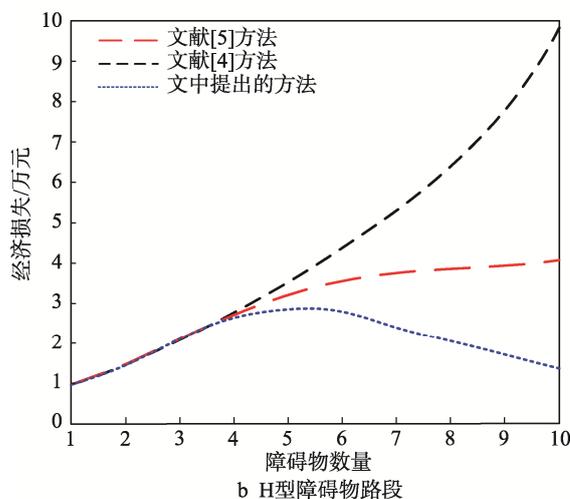
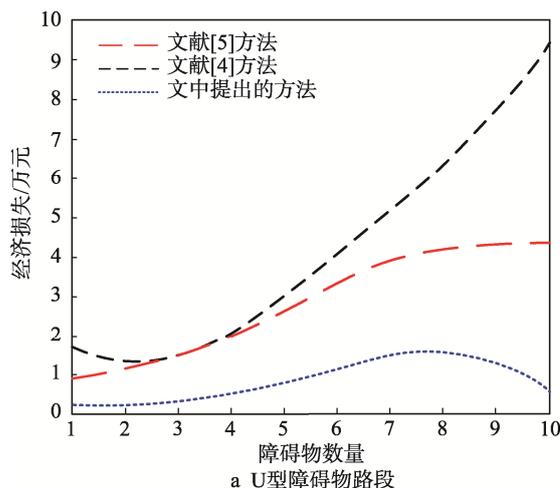


图4 自动化包装机器人的经济损失情况
Fig.4 Economic loss of automatic packaging robot

方法对自动化包装机器人造成的经济损失较大;然而在H型障碍物路段中,3种避障方法对自动化包装机器人的经济损失都有所提高,但是提出的机械手自主避障方法当障碍物数量增加到6时,有效控制了其工作时的经济损失,最后将经济损失控制到1.6万元。

3 结语

文中提出了自动化包装机器人机械手自主避障方法,结果显示,该方法的自主避障效果更好,适用于自动化包装机器人的机械手避障。在今后的学术研究中,还要重点研究机器人机械手的避障误差问题,将避障误差减小到最低,提高其避障精度。

参考文献:

[1] 姬伟,程风仪,赵德安,等.基于改进人工势场的苹果采摘机器人机械手避障方法[J].农业机械学报,2013,44(11):253—259.
JI Wei, CHENG Feng-yi, ZHAO De-an, et al. Obstacle Avoidance Method of Apple Harvesting Robot Mani-

- pulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 253—259.
- [2] MU Z, LIU T, XU W, et al. A Hybrid Obstacle-Avoidance Method of Spatial Hyper-Redundant Manipulators for Servicing in Confined Space[J]. Robotica, 2019, 37(6): 998—1019.
- [3] 祁若龙, 周维佳, 刘金国, 等. 基于概率论的机器人高斯运动避障轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 93—100.
- QI Ruo-long, ZHOU Wei-jia, LIU Jin-guo, et al. Obstacle Avoidance Trajectory Planning for Gaussian Motion of Robot Based on Probability Theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 93—100.
- [4] 于乃功, 郑宇凌, 徐丽, 等. 基于光流的非结构化环境中移动机器人避障方法[J]. 北京工业大学学报, 2017(1): 65—69.
- YU Nai-gong, ZHENG Yu-ling, XU Li, et al. Optical Flow Based Mobile Robot Obstacle Avoidance Method in Unstructured Environment[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017(1): 65—69.
- [5] 杨晶东, 杨敬辉, 蔡则苏. 基于多目标优化的移动机器人避障算法[J]. 上海交通大学学报, 2012(2): 213—216.
- YANG Jing-dong, YANG Jing-hui, CAI Ze-su. Obstacle Avoidance Algorithm for Mobile Robot Based on Multi-Objective Optimization[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012(2): 213—216.
- [6] 郑来芳, 孙炜, 欧阳明华, 等. 结合光流和人工势场的风管机器人避障方法[J]. 计算机工程与应用, 2016(9): 243—247.
- ZHENG Lai-fang, SUN Wei, OUYANG Ming-hua, et al. Obstacle Detection Method for Duct Cleaning Robot Combining Optical Flow and Artificial Potential Field[J]. Computer Engineering and Applications, 2016(9): 243—247.
- [7] 陈至坤, 曾凯, PARANJAPE R, 等. 一种改进的 HS 光流法在机器人避障系统中的应用[J]. 科学技术与工程, 2017(4): 234—238.
- CHEN Zhi-kun, ZENG Kai, PARANJAPE R, et al. A Modified HS Optical Flow Method was Used in Obstacle Avoidance System for Mobile Robots[J]. Science Technology and Engineering, 2017(4): 234—238.
- [8] 刘欢, 王健, 李金凤, 等. 未知环境下机器人避障设计研究[J]. 机械设计与制造, 2013(10): 236—238.
- LIU Huan, WANG Jian, LI Jin-feng, et al. Design of Robot Obstacle Avoidance in Unknown Environment[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(10): 236—238.
- [9] 曾凯, 陈至坤, RAMAN P, 等. 基于 HS 光流法机器人避障策略优化[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(17): 85—89.
- ZENG Kai, CHEN Zhi-kun, RAMAN P, et al. Obstacle Avoidance Strategy Optimization Based on HS Optical Flow for Mobile Robots[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(17): 85—89.
- [10] 李庆, 郑力新, 潘书万, 等. 使用单目视觉的移动机器人导航方法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(4): 223—227.
- LI Qing, ZHENG Li-xin, PAN Shu-wan, et al. Method of Mobile Robot Navigation Using Monocular Vision[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(4): 223—227.
- [11] 张启彬, 王鹏, 陈宗海. 基于速度空间的移动机器人同时避障和轨迹跟踪方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(2): 358—362.
- ZHANG Qi-bin, WANG Peng, CHEN Zong-hai. Velocity Space Based Concurrent Obstacle Avoidance and Trajectory Tracking for Mobile Robots[J]. Control and Decision, 2017, 32(2): 358—362.
- [12] 侯媛彬, 郝利波. 煤矿救援机器人自主避障方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2011(10): 90—92.
- HOU Yuan-bin, HAO Li-bo. Study on Automatic Avoiding Obstacle Method of Mine Rescue Robot Based on CERRT Algorithm[J]. Coal Science and Technology, 2011(10): 90—92.
- [13] 张海燕, 林志贤, 郭太良. 机器人避障路径规划优化控制仿真[J]. 计算机仿真, 2017, 34(9): 325—330.
- ZHANG Hai-yan, LIN Zhi-xian, GUO Tai-liang. Robot Obstacle Avoidance Path Planning Optimization Control Simulation[J]. Computer Simulation, 2017, 34(9): 325—330.
- [14] 王盟. 基于 DSP 与超声波测距的农业机器人定位与避障控制[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 207—211.
- WANG Meng. Localization and Obstacle Avoidance Control of Agricultural Robot Based on DSP and Ultrasonic Distance Measurement[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 207—211.
- [15] 张敏, 徐鉴. 振动驱动移动系统平面避障运动分析[J]. 力学学报, 2017, 49(2): 397—409.
- ZHANG Min, XU Jian. Analysis on Planar Obstacle Avoidance Locomotion Of Vibration-Driven System[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(2): 397—409.