

环境信息实时感知的图书馆搬运机器人 自动化控制系统

何佳

(西安思源学院 图书馆, 西安 710038)

摘要: 图书馆搬运机器人对于图书馆数字化、便捷化能够起到重要的促进作用; 提出一种结合双目视觉进行环境感知的方式, 同时通过改进趋近律的双闭环非线性变结构控制, 解决传统控制方式当中向理想轨迹趋近速度与抖振现象之间的矛盾关系; 经过实验验证, 在趋近律速度上, 文章提出的改进趋近律控制方式实际轨迹与理想轨迹的差值在 0.009 至 0.197 的范围之内, 传统等速趋近律方式实际轨迹与理想轨迹的差值最好情况为滑膜增益是 0.3 时, 差值在 0.098 至 0.354 之间; 同时在针对环境信息实时感知的实验中, 图书馆搬运机器人的入位准确率高达 97.8%, 证明了系统的高效性及可靠性; 相比之下, 基于环境信息实时感知的图书馆搬运机器人自动化控制系统更具优越性。

关键词: 图书馆搬运机器人; 自动化控制; 双目视觉; 改进趋近律; 环境感知

Automatic Control System of Library Handling Robots with Real-time Perception of Environmental Information

HE Jia

(The Library of Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Library handling robots can play an important role in promoting the digitization and convenience of libraries. This paper proposes an environment perception method combined with binocular vision, and solves the contradictory relationship between the approach velocity and the jitter phenomenon in the traditional control method by improving the double closed-loop nonlinear variable structure control of the approach law. Experiments show that in the velocity of the approach law, the difference between the actual trajectory and the ideal trajectory of the improved approach law control method proposed in this paper is within a range of 0.009 to 0.197, and the difference between the actual trajectory and the ideal trajectory of the traditional isokinetic approach law method is best and is between 0.098 to 0.354, with a synovial gain of 0.3. At the same time, in the experiment of real-time perception of environmental information, the accuracy rate of library handling robot is as high as 97.8%, which proves the high efficiency and reliability of the system. In contrast, based on the real-time perception of environmental information, the automatic control system of library handling robots is more superior.

Keywords: library handling robots; automatic control; binocular vision; improving the law of approach; environmental perception

0 引言

随着科学技术的不断发展, 图书馆的数字化转型成为必然的发展趋势。图书馆的服务方式和管理效率的提升直接关系到知识传播的速度和广度。图书馆搬运机器人的研发是图书馆数字化、智能化转型的重要组成部分, 可以通过智能搬运机器人对图书馆进行图书管理, 减少人力资源消耗, 并提高图书管理效率。图书馆搬运机器人通过对环境做出感知, 并按照给定指令进行动作, 进行图书馆中的图书搬运盘点以及排架等工作, 即节省了人力资源, 也提高图书盘点效率。

图书馆自动化技术的发展始于 20 世纪末, 最初的自动

化系统主要集中在图书管理软件和自助借还服务上。随着技术的进步, 图书馆自动化逐渐扩展到了更多领域, 包括图书检索、盘点、分类和搬运等。其中, 美国国会图书馆的 LC Catalog 系统提供了更加友好的交互界面以及复杂的检索算法, 帮助读者快速确定所需图书位置; 荷兰的 Wageningen University Library 采用射频识别技术 (RFID) 技术进行图书盘点, 显著提高了盘点速度和准确性; 德国的 Regensburg Library Network 通过自动化系统实现了高效的图书分类和索引, 提高了图书馆的运营效率。

图书馆搬运机器人的核心技术包括环境感知、轨迹跟踪、路径规划以及自动化控制等。其中, 图书馆搬运机器人的路径规划控制以及环境感知技术是图书馆搬运机器人

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2024-02-02。

作者简介: 何佳 (1983-), 女, 硕士。

引用格式: 何佳. 环境信息实时感知的图书馆搬运机器人自动化控制系统[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 181-188.

实现智能化服务的关键技术。路径规划控制关系到图书馆搬运机器人在图书馆内高效准确的进行移动，能够按照需求向目的地运行。在具体的路径规划控制中，需要综合考虑图书馆的空间布局以及图书馆搬运机器人的避障能力，保证图书馆搬运机器人能够形成一套高效且安全的路径。同时，也要求轨迹规划控制中，通过算法或者神经网络提高图书馆搬运机器人的移动控制能力，提高系统的稳定性以及相应速度。

环境感知作为图书馆搬运机器人的核心技术之一，主要负责对周围环境进行精准的识别和更精确的处理。图书馆搬运机器人结合精准的环境感知做出更合适的行动策略。基于双目视觉的环境感知系统，通过模拟人类的双眼视觉，能够更好获取实际环境中的深度视觉信息，实现在复杂场景中的高精度识别和快速定位。基于双目视觉的图书馆搬运机器人不仅能够保证行进路线的精确性，同时在遇到障碍物的时候可以做出快速反应，提高图书馆搬运机器人的灵活性和安全性。双目视觉的黄金感知系统是一种基于双目立体视觉技术的人机交互系统，该系统能够通过对物体的 3D 图像处理和分析，实现对物体的精准感知和识别。在这个系统中，双目相机通过获取两个不同视角的图像，从而获得物体的深度信息。轨迹跟踪控制系统是一种用于实现对移动目标轨迹的跟踪和控制的系统，它主要针对运动目标在时间和空间上的连续变化进行处理和控制。通过使用图像序列处理算法，如光流法、背景减除、卡尔曼滤波等技术，可以实现对运动目标的检测和跟踪。

近年来，随着人工智能和机器人技术的突破，图书馆搬运机器人的研究和应用成为了图书馆自动化领域的新热点。如张宣政设计的图书馆机器人具备书库自动盘点功能^[1]，黄嘉琪针对图书馆机器人如何进行导航做出了研究^[2]，沈奎林等结合射频识别技术，设计了一种图书馆内能进行自动盘点的机器人^[3]。国外研究领域，美国卡内基梅隆大学开发了一个名为“LibBot”的图书馆机器人，它能够自动搬运图书并将其放置在正确的位置。日本的国立情报学研究所（NII）也在图书馆机器人领域进行了研究，他们开发的机器人能够在图书馆内自主导航，并执行图书搬运和整理工作。此外，欧洲的一些研究项目，如 EU 的 STARS 项目，也在探索图书馆机器人的应用，旨在通过机器人技术提高图书馆服务的质量和效率。

图书馆搬运机器人需要满足对环境信息实时感知以及轨迹运动两个基本功能。设计在环境实时感知的基础上，结合变结构趋近律对其行进轨迹做出了更为准确的控制^[4-5]。通过改进对应的趋近律，实现对姿态和位置的双目标自动化控制。在保证轨迹控制快速精确的前提下，避免出现相应的抖振现象。

1 基于双目视觉的环境感知系统

1.1 环境感知系统概述

图书馆搬运机器人通过双目视觉做出环境感知，从而

实现图书馆环境内的识别定位^[6]。双目视觉技术的基础依据是视差原理，通过左右摄像头对二维图像信息进行采集计算，得到对应的三维数据信息，实现识别判断的效果。由于左右摄像头的位置不同，对于相同的二维图像信息，采集到的像素坐标也会有所差异，通过计算这些差值，能够转换得到相应的三维数据信息^[7]。对于图书馆搬运机器人而言，通常采用平行式双目视觉进行实际的环境信息感知。其双目视觉的摄像系统示意图如图 1。

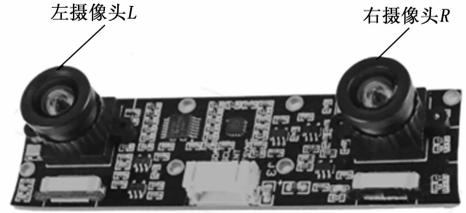


图 1 双目视觉摄像系统图

图 1 中，双目视觉系统通过左摄像头 L 以及右摄像头 R 进行图像数据采集。两个摄像头平行于 Z 轴，并处于同一平面。检测目标图像点位的深度通过相似三角形的原理计算求取^[8-11]。

1.2 坐标系转换及标定

其实际的工作原理示意图可以表示如图 2 所示。

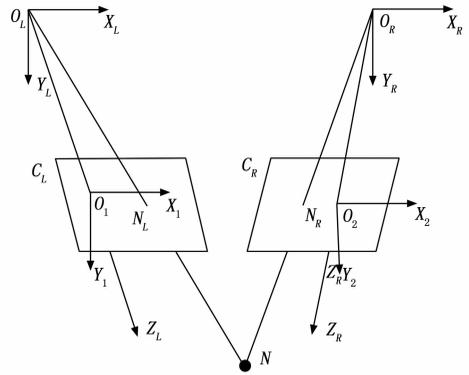


图 2 双目视觉工作原理图

图 2 中，左采集图像对应的坐标系表示为 $O_1 X_1 Y_1$ ，右采集图像对应的坐标系表示为 $O_2 X_2 Y_2$ 。左侧摄像头坐标系表示为 $O_L X_L Y_L Z_L$ ，右侧摄像头坐标系表示为 $O_R X_R Y_R Z_R$ ，分别对应摄像头感知的三维世界坐标 $X_L Y_L Z_L$ 与 $X_R Y_R Z_R$ 。目标检测点表示为点 N 。目标检测点在左侧采集图像的成像点表示为 N_L ，在右侧采集图像中的成像点表示为 N_R 。摄像头的焦距设定为 f ，依据成像关系，左侧采集图像与摄像头之间的关系可以描述如下。

$$Z_L \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

右侧采集图像与摄像头之间的关系可以描述如下。

$$Z_R \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

上述公式中， f_1 与 f_2 分别为对应摄像头的焦距。左右摄像头分别可以得到目标检测点对应的成像点坐标，需要将左右摄像头的坐标系进行统一^[12]。设定世界坐标系为左侧摄像头对应的坐标系，那么右侧坐标系需要进行一定的平移以及旋转，转换到对应的左侧坐标。设需要平移的量为 D ，旋转量为 R ，通过立体标定的方式对其进行求解。

设目标检测点对应的世界坐标为 N_w ，左侧摄像头对应检测点坐标为 N_l ，右侧摄像头对应检测点坐标为 N_r 。左右两侧平移矩阵分别表示为 D_l 和 D_r ，旋转矩阵分别表示为 R_l 和 R_r ，其对应的关系可以表示如下。

$$\begin{cases} N_l = R_l N_w + D_l \\ N_r = R_r N_w + D_r \end{cases} \quad (3)$$

由于设定左侧为世界坐标系，那么可以得到式 (4)。

$$N_l = R N_r + D \quad (4)$$

由此可以得到式 (5)。

$$\begin{cases} R = R_l R_r^{-1} \\ D = D_l - R_l R_r^{-1} D_r \end{cases} \quad (5)$$

由此得到左侧坐标系与右侧坐标系对应的变换矩阵，将其表示为 T ，如式 (6)。

$$T = R \cdot D = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

摄像头感知的三维世界坐标 $X_l Y_l Z_l$ 与 $X_r Y_r Z_r$ 按照式 (7) 进行对应的坐标系变换。

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式 (8) 可以对目标检测点 N 实际的世界坐标系进行求取。

$$\begin{cases} X_w = \frac{X_l Z_l}{f_1} \\ Y_w = \frac{Y_l Z_l}{f_1} \\ Z_w = \frac{f_1(f_2 d_x - X_R d_z)}{X_R(r_{31} X_L + r_{32} Y_L + r_{33} f_1) - f_2(r_{11} X_L + r_{12} Y_L + r_{13} f_1)} = \frac{f_1(f_2 d_y - Y_R d_z)}{Y_R(r_{31} X_L + r_{32} Y_L + r_{33} f_1) - f_2(r_{21} X_L + r_{22} Y_L + r_{23} f_1)} \end{cases} \quad (8)$$

1.3 图书馆搬运系统中双目视觉技术应用

双目视觉技术的本质是模拟人类双眼获取深度信息，

通过两个相机将检测坐标转换为世界坐标，得到物体的实际三维位置。图书馆搬运机器人中双目视觉技术的应用，主要需要考虑摄像头的分辨率、帧率、视角，相机间距以及图像处理算法等。摄像头具有更高分辨率可以明显提高环境感知的识别精度；更高帧率则可以提高环境感知的敏锐度，实时捕捉环境变换；视角决定的图书馆搬运机器人的环境感知范围。同时，摄像头的间距需要结合机器人的实际操作需要以及图书馆的空间尺寸进行灵活调整，以保证深度感知的效果最佳。

双目视觉系统保障了图书馆搬运机器人的实时环境感知，主要体现在图书定位、障碍物检测以及路径规划等方面的应用。障碍检测功能确保图书馆搬运机器人在运行时能够准确及时的识别出图书馆内的行人、书架以及桌椅等障碍物，并结合算法依据障碍物位置试试调整路径以避免碰撞。图书定位功能通过识别图书的尺寸、标签以及颜色等特征数据，进行图书查找以及按照指定位置搬运。路径规划功能是依据图书馆的内部布局以及图书位置，进行更适合环境的路径规划。

双目视觉系统针对图书馆搬运机器人的应用过程，可以表示如图 3 所示。

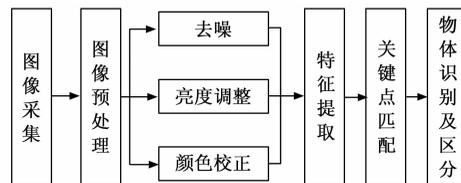


图 3 双目视觉在图书馆搬运机器人系统中的应用

双目视觉在在图书馆搬运机器人中的应用相比单目视觉的应用而言，具有更多优势。首先，双目视觉可以提供更加丰富的深度信息，保证图书馆搬运机器人对环境感知的精确率，提高搬运机器人定位以及搬运的精度；其次，双目视觉技术具有更好的适应性，能够在不同的视觉条件以及光照条件下稳定工作；同时双目视觉技术的实时处理能力较强，能够对环境变化做出实时感知，提高了图书馆搬运机器人的操作效率以及安全性。

针对图书馆搬运机器人而言，双目视觉技术的应用进一步保障了图书馆搬运机器人的环境信息实时感知的能力，同时提高了图书馆搬运机器人在复杂环境中的可靠性以及安全性。未来随着图像处理技术和深度学习算法的进一步发展，双目视觉技术在图书馆搬运机器人中的应用将更加广泛和深入。

基于双目视觉的环境感知系统在图书馆搬运机器人中的应用可以提高机器人的导航、障碍物检测和物体识别能力，从而实现更智能、高效的图书馆搬运工作。双目视觉系统可以获取机器人周围环境的深度信息，通过计算视差来推测物体和障碍物的距离。利用这些深度信息，机器人能够实时感知周围环境的空间结构，并进行自主导航和定

位, 以避免碰撞和避开障碍物。双目视觉系统可以快速、准确地检测周围环境中的障碍物。机器人通过计算视差和深度信息, 可以确定障碍物的位置和大小, 从而在移动过程中避免与其碰撞。这样, 机器人能够更安全地穿越狭窄通道、避开桌椅和其他障碍物, 保证所搬运物品的安全。双目视觉系统可以进行物体的识别和分割。机器人通过获取物体的双目图像, 并进行特征提取和匹配, 可以对搬运的图书进行自动识别和分类。基于物体的特征信息, 机器人可以准确地定位和抓取图书, 并确保正确投放到指定位置。

2 轨迹跟踪控制系统

2.1 轨迹跟踪控制系统设计

通过双目视觉系统对图书馆内信息做出实时环境感知之后。图书馆搬运机器人通过双闭环控制在图书馆环境当中进行轨迹跟踪以及运动控制。双闭环控制当中, 外环为对应的位置控制器, 内环为对应的姿态控制器。对于外环位置控制器而言, 设定输出角度 β , 并将其作为内环中姿态控制器所需要的参考角度。在收敛速度上, 需要保证内环的响应速度快于外环, 对于输出角度 β 的跟踪需要结合图书馆搬运机器人的具体输出角度, 从而确保双闭环控制系统稳定^[11]。位置子系统作为外环主要系统, 进行系统稳定性控制, 避免出现太过强烈的抖振现象。

2.2 姿态子系统

在姿态子系统当中, 输出角度与目标角度之间的角度误差表示为 d , $d = \alpha_1 = \beta - \beta'$, 对角度误差求导得到 $d' = \alpha_2 = \omega - \beta'$ 。对变结构滑模面进行设计, 将其表示为如下:

$$S_1 = \tau_1 \alpha_1 + \alpha_2 \quad (9)$$

对式 (9) 进行求导, 并离散化, 得到式 (10)。

$$\frac{S_1(t+1) - S_1(t)}{T_s} = \begin{cases} -\frac{k_1}{\lambda_1} \operatorname{sgn}(s_1(t)), & |\alpha_1(t)| > \delta_1 \\ -k_1 (|\alpha_1(t)|^\gamma + \rho)^{-1} \operatorname{sgn}(S_1(t)), & |\alpha_1(t)| \leq \delta_1 \end{cases} \quad (10)$$

结合式 (10), 可以将图书馆搬运机器人的姿态子系统表示如下:

$$\omega(t) = \begin{cases} -\frac{k_1}{\tau_1 \lambda_1} \operatorname{sgn}(S_1(t)) + \frac{\beta_i(t+1) - \beta_i(t)}{T_s} - \frac{\alpha_2(t+1) - \alpha_2(t)}{\tau_1 T_s}, & |\alpha_1(t)| > \delta_1, \\ -\frac{k_1}{\tau_1} (|\alpha_1(t)|^\gamma + \rho)^{-1} \operatorname{sgn}(S_1(t)) + \frac{\beta_i(t+1) - \beta_i(t)}{T_s} - \frac{\alpha_2(t+1) - \alpha_2(t)}{\tau_1 T_s}, & |\alpha_1(t)| \leq \delta_1 \end{cases} \quad (11)$$

2.3 基于环境感知的位置控制系统

为了实现图书馆搬运机器人在复杂图书馆环境中的精确

定位与稳定搬运, 研究设计了基于环境感知的位置控制系统。系统集成双目视觉技术以及改进趋近律运动控制, 实时感知环境变换并动态调整机器人的行进轨迹, 以保证图书馆搬运机器人稳定准确完成任务。其具体流程图如图 4。

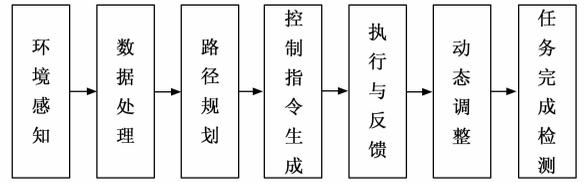


图 4 基于环境感知的位置控制

图 4 中, 机器人的位置控制系统作为外环控制, 执行的具体功能为位置跟踪如下:

$$\begin{cases} x'_p = v \cos \beta \\ y'_p = v \sin \beta \\ \beta' = \omega \end{cases} \quad (12)$$

结合式 (12) 可以得到图书馆搬运机器人的位置误差, 将其表示如下:

$$\begin{cases} x_d = x_p - x_t \\ y_d = y_p - y_t \end{cases} \quad (13)$$

对图书馆搬运机器人的位置控制器设计对应的变结构滑模面, 表述如下:

$$\begin{cases} S_2 = \tau_2 x_d + x'_d \\ S_3 = \tau_3 y_d + y'_d \end{cases} \quad (14)$$

求导式 (14) 并离散化, 得到式 (15) 以及式 (16):

$$\frac{S_2(t+1) - S_2(t)}{T_s} = \begin{cases} -\frac{k_2}{\lambda_2} \operatorname{sgn}(S_2(t)), & |x_d(t)| > \delta_2 \\ -k_2 (|x_d(t)|^\gamma + \rho)^{-1} \operatorname{sgn}(S_2(t)), & |x_d(t)| \leq \delta_2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{S_3(t+1) - S_3(t)}{T_s} = \begin{cases} -\frac{k_3}{\lambda_3} \operatorname{sgn}(S_3(t)), & |y_d(t)| > \delta_3 \\ -k_3 (|y_d(t)|^\gamma + \rho)^{-1} \operatorname{sgn}(S_3(t)), & |y_d(t)| \leq \delta_3 \end{cases} \quad (16)$$

在式 (15) 以及式 (16) 中, 设 $v \cos \beta$ 为 l_1 , 设 $v \sin \beta$ 为 l_2 。外环的位置控制系统可以表示为式 (17) 以及式 (18):

$$l_1(t) = \begin{cases} -\frac{k_2}{\tau_2 \lambda_2} \operatorname{sgn}(S_2(t)) + \frac{x_i(t+1) - x_i(t)}{T_s} - \frac{x_d(t+2) - 2x_d(t+1) + x_d(t)}{\tau_2 T_s^2}, & |x_d(t)| > \delta_2, \\ -\frac{k_2}{\tau_2} (|\alpha_d(t)|^\gamma + \beta)^{-1} \operatorname{sgn}(S_2(t)) + \frac{x_i(t+1) - x_i(t)}{T_s} - \frac{x_d(t+2) - 2x_d(t+1) + x_d(t)}{\tau_2 T_s^2}, & |x_d(t)| \leq \delta_2 \end{cases} \quad (17)$$

$$l_2(t) =$$

$$\begin{cases} -\frac{k_3}{\tau_3 \lambda_3} \operatorname{sgn}(S_3(t)) + \frac{y_r(t+1) - y_r(t)}{T_s} - \\ \frac{y_d(t+2) - 2y_d(t+1) + y_d(t)}{\tau_3 T_s^2}, |y_d(t)| > \delta_3, \\ -\frac{k_3}{\tau_3} (|y_d(t)|^\gamma + \beta)^{-1} \operatorname{sgn}(S_3(t)) + \frac{y_r(t+1) - y_r(t)}{T_s} - \\ \frac{y_d(t+2) - 2y_d(t+1) + y_d(t)}{\tau_3 T_s^2}, |y_d(t)| \leq \delta_3 \end{cases} \quad (18)$$

式 (17) 以及式 (18) 中, 将 l_1 以及 l_2 代入, 可以得到式 (19):

$$\tan\beta = \frac{l_2}{l_1} \quad (19)$$

式 (19) 中, $\beta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$, β 表示位置控制时的期望角度。可以通过下式求取:

$$\beta = \arctan \frac{l_2}{l_1} \quad (20)$$

由此可以将图书馆搬运机器人的位置控制系统表示如下:

$$v = \frac{l_1}{\cos\beta} \quad (21)$$

2.4 变结构控制稳定性

2.4.1 姿态控制稳定性

对李雅普诺夫函数做出如下定义^[12]:

$$V_a = \frac{S_1^2}{2} \quad (22)$$

求导式 (22), 得到式 (23):

$$V'_a = S_1 S'_1 = \begin{cases} -\frac{k_1}{\lambda_1} S_1 \operatorname{sgn}[S_1(t)], | \alpha_1(t) | > \delta_1 \\ -k_1 (| \alpha_1(t) |^\gamma + \sigma)^{-1} \\ S_1 \operatorname{sgn}(S_1(t)), | \alpha_1(t) | \leq \delta_1 \end{cases} = \begin{cases} -\frac{k_1}{\lambda_1} | S_1(t) |, | \alpha_1(t) | > \delta_1 \\ -k_1 (| \alpha_1(t) |^\gamma + \sigma)^{-1} \\ | S_1(t) |, | \alpha_1(t) | \leq \delta_1 \end{cases} \quad (23)$$

式 (23) 中, γ 表示系统中引入的负实数, σ 表示系统中引入的正整数, $\lambda \in (0, 1)$, 由式 (23) 可以推导出式 (24):

$$V'_a \leq 0 \quad (24)$$

依据李亚普诺夫稳定性理论, 当在平衡状态下受到扰动时, 仍然能够停留在平衡点附近, 那么便认为系统稳定。结合式 (23) 与式 (24), 姿态控制系统负荷李亚普诺夫稳定性理论。

2.4.2 位置控制稳定性

对 x 以及 y 轴对应的控制器进行李亚普诺夫定义, 定义 x 的函数为 V_b , 定义 y 轴的函数为 V_c , 将其表示如下:

$$\begin{cases} V_b = \frac{S_2^2}{2} \\ V_c = \frac{S_3^2}{2} \end{cases} \quad (25)$$

求导式 (25), 可以推导出式 (26) 以及式 (27):

$$V'_b = S_2 S'_2 =$$

$$\begin{cases} -\frac{k_2}{\lambda_2} S_2 \operatorname{sgn}(S_2(t)), |x_d(t)| > \delta_2 \\ -k_2 (|x_d(t)|^\gamma + \sigma)^{-1} \\ S_2 \operatorname{sgn}(S_2(t)), |x_d(t)| \leq \delta_2 \end{cases} = \begin{cases} -\frac{k_2}{\lambda_2} | S_2 |, |x_d(t)| > \delta_2 \\ -k_2 (|x_d(t)|^\gamma + \sigma)^{-1} \\ S_2 | S_2 |, |x_d(t)| \leq \delta_2 \end{cases} \quad (26)$$

$$V'_c = S_3 S'_3 =$$

$$\begin{cases} -\frac{k_3}{\lambda_3} S_3 \operatorname{sgn}(S_3(t)), |y_d(t)| > \delta_3 - \\ k_3 (|y_d(t)|^\gamma + \sigma)^{-1} \\ S_3 \operatorname{sgn}(S_3(t)), |y_d(t)| \leq \delta_3 \end{cases} = \begin{cases} -\frac{k_3}{\lambda_3} | S_3 |, |y_d(t)| > \delta_3 \\ -k_3 (|y_d(t)|^\gamma + \sigma)^{-1} \\ S_3 | S_3 |, |y_d(t)| \leq \delta_3 \end{cases} \quad (27)$$

式 (26) 以及式 (27) 中, γ 表示系统中引入的负实数, σ 表示系统中引入的正整数, $\lambda \in (0, 1)$, 由式 (26) 以及式 (27) 可以推导出式 (28):

$$\begin{cases} V'_b \leq 0 \\ V'_c \leq 0 \end{cases} \quad (28)$$

结合李普亚诺夫稳定性, 图书馆搬运机器人的位置控制是稳定的^[13-14]。

2.5 轨迹跟踪控制关键技术及实现流程

2.5.1 轨迹跟踪控制关键技术

轨迹跟踪控制实现的关键技术主要包括模型预测控制、非线性控制策略以及传感器数据融合技术。

模型控制预测技术对未来一段时间内的轨迹进行预测, 并对轨迹跟踪控制的输入进行进一步优化, 以保证轨迹误差最小^[15]。非线性控制策略为更好处理外部扰动以及系统的非线性特性, 以保证控制系统具有更好的鲁棒性。传感器数据融合技术通过对双目视觉系统、陀螺仪以及编码器 etc 采集到的数据进行处理, 保证图书馆搬运机器人在图书馆环境下进行轨迹控制时的精确定位。

2.5.2 轨迹跟踪控制实现流程

图书馆搬运机器人的轨迹控制实现主要包括两个部分的内容: 一是轨迹的跟踪控制, 二是轨迹生成。其中, 轨迹的跟踪控制保证图书馆搬运机器人能够按照既定轨迹移动; 轨迹生成主要通过结合对图书馆复杂环境的感知生成能够到达目标书架位置的最优路径。实际轨迹跟踪控制过程中, 采用双闭环控制策略, 外环控制器负责生成参考轨迹上速度以及目标位置, 内环控制器负责通过匹配外环给出的参考型号, 调整机器人实际的运动方向轨迹运动速度^[16]。通过双闭环控制的方式, 能够将位置控制以及速度控制分离, 从而提高系统整体的相应速度以及运行的稳定性。

在进行轨迹生成时，主要基于图书馆平面图以及图书位置信息进行轨迹规划，生成由起点至目标点的路径。生成路径要求连续且尽量无碰撞，既要考虑图书馆的静态障碍物，同时要考虑路径规划是否能够及时合理的规避动态障碍物。

算法实现上，通过双目视觉技术对图书馆搬运机器人当前的位置以及姿态信息进行采集，而后输入到模型预测控制模块中^[17]。模型预测控制模块得到相应的机器人数据信息，给出速度以及方向的最优控制指令，驱动图书馆搬运机器人按照指定方向移动。在此过程中，通过改进的变结构控制技术，保证图书馆搬运机器人在基于环境信息实际感知的轨迹移动中更加平稳，避免抖振现象的产生。

具体视线过程如下。

视线计算：通过使用目标的位置信息和传感器的安装位置，计算出机器人与目标之间连线的方向角度。

视线偏差计算：将计算得到的视线方向角度与期望的视线方向角度进行比较，计算出视线的偏差，即机器人与目标之间的角度误差。

视线控制：根据视线偏差，通过相应的控制算法调整机器人的朝向，使其保持与目标的视线对准。

在轨迹跟踪控制系统中，通过增加关键的视线技术，可以提高对目标的精确跟踪和控制能力。选择合适的视觉传感器，如摄像头或激光雷达，以获得高质量的目标图像和深度信息。通过使用计算机视觉算法，如特征提取和目标跟踪，从目标图像中提取出关键特征，并跟踪目标的运动，以获取目标的位置和姿态信息。当视线偏差较大时，可以采取视线校正技术，如旋转控制或路径规划，来调整机器人的朝向，使其与目标保持良好的对准。

3 实验设计及结果分析

3.1 搬运机器人控制仿真验证

为验证图书馆搬运机器人自动化控制的合理性以及稳定性，将结合改进的趋近律控制算法与传统以等速趋近律为基础的双闭环控制进行对比^[18]，并进行算例验证。通过 Matlab 进行算例仿真，硬件选择 Think Centre M920t，CPU 为 3.2 GHz。在等速趋近律的双闭环控制系统中，针对外环控制，其滑模增益 k_{d2} 的值设置为 3，滑模增益 k_{d3} 的值设置为 5；针对内环控制，其滑模增益 k_{d1} 的值设置为 3，滑模增益 k_{d4} 的值设置为 0.1。

改进系统中参数设计如下： $\gamma = -1$ ， $\lambda_1 = 0.2$ ， $\lambda_2 = 0.2$ ， $\lambda_3 = 0.2$ ， $\beta = 3$ ， $k_1 = 3$ ， $k_2 = 1$ ， $k_3 = 0.6$ ， $\delta_1 = 0.01$ ， $\delta_2 = 0.1$ ， $c_1 = 0.01$ ， $c_2 = 0.01$ ， $c_3 = 0.01$ 。同时设定常规等速趋近律下，滑模增益的值为 0.1 与 3 时与理想轨迹的差值分别为 $D_{0.1}$ 与 D_3 ，在改进算法的情况下，实际轨迹与理想轨迹的差值为 D_G 。同时，为验证其环境感知的准确性，针对某图书馆进行实验。该图书馆共包含科室 7 个，共计约 1 万平方米的占地面积，包括卷宗 37.5 万卷。将本设计的图书馆搬运机器人按照设定轨迹投放使用，图书馆搬运器

人实际工作场景如图 5。



图 5 图书馆搬运机器人工作场景

改进图书馆搬运机器人轨迹控制与以常规等速趋近律的趋近速度对比结果如图 6 及图 7。

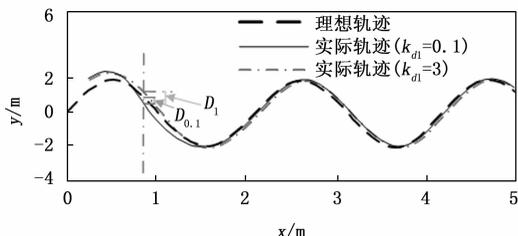


图 6 常规等速趋近律趋近速度

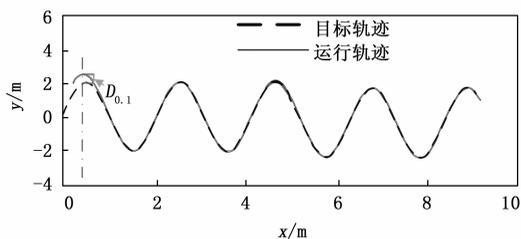


图 7 改进系统趋近速度

图 6 中，当 $k_{d1} = 0.1$ 时， $D_{0.1}$ 最大为 0.354，最小为 0.098，以等速趋近律为基础的控制方式趋近速度相对较慢，也即对理想轨迹进行跟踪的时间比较长；当 $k_{d1} = 3$ 时， D_3 最大为 0.412，最小为 0.101，以等速趋近律为基础的控制方式趋近速度更加快速，能够对理想轨迹实现更加快速的跟踪效果。图 7 中，改进系统的 D_G 最大为 0.197，最小为 0.009，趋近速度相较于图 6 中 $k_{d1} = 3$ 的情况，趋近速度更为快速，同时对理想轨迹的跟踪更加紧密，表明改进系统具有更快更精确的趋近速度。

3.3 环境感知准确度实验

某图书馆的室内平面图可以表示为图 8。

为验证其环境感知的准确性以及变结构趋近律对轨迹控制的影响，设定路径 A 与路径 B。分别抽取路径中对应的坐标点，验证实际轨迹移动路径与环境感知的准确度。

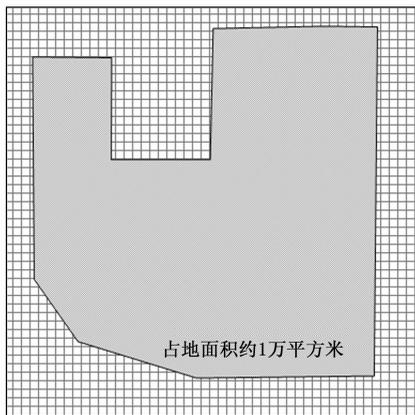


图 8 图书馆室内平面图

得到的实验结果如图 9 所示。

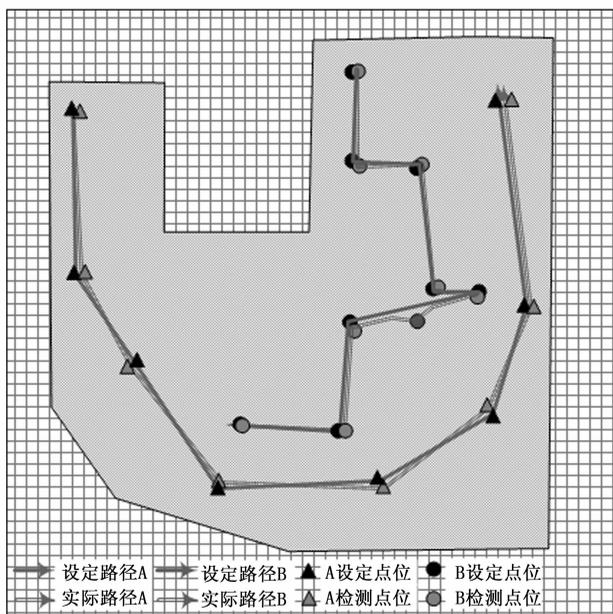


图 9 路径检验结果示意图

图 9 中，对于设定路径 A 与设定路径 B，结合变结构趋近律的环境感知图书馆搬运机器人的实际运动轨迹几乎与设定轨迹吻合。抽取的坐标点位基本相近，也就是说图书馆搬运机器人能够按照设定轨迹运行，同时结合双目视觉进行具体的环境感知，以达到准确路线行进的目的。其中设定路径 B 与实际路径 B 在障碍物点位存在较大差异，如图 10 所示。

图 10 中，在设定路径上存在凳子也即障碍物。搬运机器人通过双目视觉检测到障碍物后，及时调整行进角度，并在避障后回到设定轨迹。同时，在实际图书搬运入位测试中，机器人成功将图书摆放到指定位置的准确率达到了 97.8%。此外，通过遥控指挥系统，操作员能够远程调整机器人的行动，进一步确保图书被准确放置在预定位置。这种遥控指挥系统允许操作员实时监控机器人的位置和行

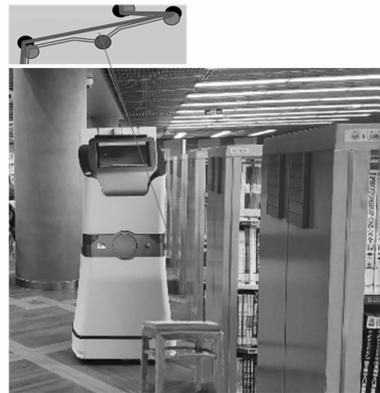


图 10 设定路径障碍物点

动，并提供必要的指令以达到目标位置。通过遥控指挥系统，操作员可以及时进行调整和干预，确保图书被准确放置，提高系统的灵活性和精确性。也即通过环境感知，图书馆搬运机器人能够依据设定轨迹灵活行进，具有快速准确的避障能力。

综上所述，通过高准确率的图书搬运入位测试和遥控指挥系统的使用，可以确信系统能够通过指挥到达指定位置，并且具备可靠的搬运能力。

4 结束语

图书馆搬运机器人通过双目视觉进行相应的环境信息实时感知。针对其轨迹控制与跟踪，结合变结构趋近律进行轨迹位置控制。对某图书馆进行实际实验，并进行实际分析。分别从两方面考察图书馆搬运机器人的可行性。一是轨迹行动的准确度与灵活度，二是环境感知的精确性与及时性。结果表明通过双目视觉能够更好地进行环境感知，实际位置坐标与检测位置坐标基本吻合。同时改进系统在轨迹控制上，既能够保证轨迹行进的速度，也能保证轨迹行进的灵活性和精确性，改进后实际轨迹与设定轨迹联系更加紧密。未来的研究重点将结合滑模控制以期实现更加平稳准确的图书馆搬运机器人控制。为了更好地感知和理解环境，图书馆搬运机器人可以采用多种感知模态，如视觉、声音、力觉等。这将帮助机器人更全面地获取周围环境的信息，并且利用多模态数据来识别不同的物体、障碍物和环境条件。在机器人自动化控制系统的发展中，数据安全和隐私保护将变得越来越重要。保护用户的个人信息和图书馆数据的安全，例如采用加密通信、数据匿名化等方法，是未来发展的重要方向。

参考文献：

[1] 郭 瑛. 改进 ABC 算法的图书馆服务机器人路径规划 [J]. 信息技术, 2022, 46 (12): 19-23.
 [2] 雷水旺. 智能时代图书馆机器人技术赋能的伦理困境及其规制 [J]. 图书情报导刊, 2023, 8 (6): 1-7.
 [3] 赵智娟, 李玉成, 王 爽. 动态不确定性的图书馆机器人导航和路径筛选应用研究 [J]. 现代科学仪器, 2023, 40 (3):

112-117.

- [4] 庄新辉. U-RT 和 UJI 两种图书馆机器人系统运行方式对比研究 [J]. 武夷学院学报, 2018, 37 (3): 58-62.
- [5] 杜明芳, 方建军, 梁岚珍. 图书馆机器人机械手参数自整定模糊 PID 控制器设计 [J]. 智能系统学报, 2012, 7 (2): 161-166.
- [6] 沈奎林, 邵波, 陈力军. 图书馆智能盘点机器人定位研究 [J]. 图书情报导刊, 2020, 5 (7): 34-40.
- [7] 丁思敏, 汪峥. 基于 PageRank 算法的机器人专利推荐系统开发 [J]. 工业控制计算机, 2023, 36 (11): 102-104.
- [8] 李小燕, 员立亭. 基于 SLAM 算法的图书馆服务机械人的路径研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023 (5): 201-206211.
- [9] 王海波, 蒋羽鑫. 基于霍尔传感器的图书管理助手机器人定位技术应用研究 [J]. 中阿科技论坛 (中英文), 2021 (11): 70-72.
- [10] 王又平. 人工智能及数据挖掘在高校图书馆网络阅读服务平台构建中的应用 [J]. 信息记录材料, 2023, 24 (6): 218-220.
- [11] 丁玲. 基于深度学习的图书馆文献自动检索机器人研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022 (3): 177-181.
- [12] 唐丽娜, 李琳, 宿浩, 等. 在狭窄通道环境下书库管理机器人的最优路径规划 [J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2021, 51 (3): 125-130.
- [13] 张岩, 赵蒙蒙, 孙英伟, 等. 基于卷积神经网络和混合注意力机制的书标检测算法 [J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2023, 42 (3): 94-102.
- [14] 孙瑞, 谭秀芬. 基于滑膜控制的井下巡检机器人运动控制系统设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2019 (1): 119-122126.
- [15] 徐林玲, 周远, 黄鸿云, 等. 基于碰撞危急程度和深度强化学习的实时轨迹规划算法 [J]. 计算机科学, 2023, 50 (3): 323-332.
- [16] 赵杨, 张雪, 王玮航, 等. 基于多模态情感分析的图书馆智能服务用户情感体验度量 [J]. 情报科学, 2023, 41 (9): 155-163172.
- [17] 王秀红, 王欣, 王少凡, 等. 基于 SimCSE-LDA 和异常检测的颠覆性技术识别方法——以农业机器人为例 [J]. 情报理论与实践, 2023, 46 (5): 135-143.
- [18] 王红芳, 武薛, 宣静雯. 基于图书索书号识别的在架图书错序检测方法 [J]. 新世纪图书馆, 2023 (1): 31-36.
- [15] CABRAL-PACHECO E G, VILLARREAL-REYES S, GALAVIZ-MOSQUEDA A, et al. Performance analysis of multi-hop broadcast protocols for distributed UAV formation control applications [J]. IEEE Access, 2019, 7: 113548-113577.
- [16] ZHANG J, YAN J, ZHANG P. Multi-UAV formation control based on a novel back-stepping approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69 (3): 2437-2448.
- [17] ZHIHAO C, LONGHONG W, JIANG Z, et al. Virtual target guidance-based distributed model predictive control for formation control of multiple UAVs [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33 (3): 1037-1056.
- [18] YINGXUN W, ZHANG T, ZHIHAO C, et al. Multi-UAV coordination control by chaotic grey wolf optimization based distributed MPC with event-triggered strategy [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33 (11): 2877-2897.
- [19] GOMEZ-AVILA J, LÓPEZ-FRANCO C, ALANIS A Y, et al. Control of Quadrotor using a Neural Network based PID; 2018 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI), 2018 [C]. IEEE.
- [20] 董守田, 杨利红, 康成吉, 等. 固定翼无人机姿态控制及仿真 [J]. 东北农业大学学报, 2015, 46 (9): 87-92.
- [21] 唐余, 林达. 固定翼无人机轨迹跟踪的滑模变结构控制 [J]. 四川理工学院学报 (自然科学版), 2018, 31 (4): 36-42.
- [22] MEIER LORENZ. PX4 自动驾驶用户指南 (main) [EB/OL]. [2023/12/12]. <https://docs.px4.io/main/zh/index.html>.
- [23] ROS 教程官网. Documentation [EB/OL]. [2023/12/12]. <http://wiki.ros.org/cn>.

(上接第 180 页)

- [5] 钱贝, 周绍磊, 肖支才, 等. 通信时延条件下的多无人机系统编队包含控制 [J]. 战术导弹技术, 2023, 30 (5): 66-72.
- [6] 赵学远, 周绍磊, 王帅磊, 等. 切换拓扑条件下的多无人机系统编队包含控制 [J]. 计算机科学, 2020, 47 (S01): 6.
- [7] 张丹凝, 程岳, 林清, 等. 无人机集群作战关键技术及发展趋势 [J]. 中国新通信, 2022 (24-004).
- [8] WANG C, YU W, LU J, et al. UAV-based physical-layer intelligent technologies for 5G-enabled internet of things: a survey [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 1-5.
- [9] RADMANESH M, KUMAR M, GUENTERT P H, et al. Overview of path-planning and obstacle avoidance algorithms for UAVs: A comparative study [J]. Unmanned systems, 2018, 6 (2): 95-118.
- [10] 张宏宏, 甘旭升, 李昂, 等. 基于速度障碍法的无人机避障与航迹恢复策略 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (8): 1759-1767.
- [11] 王祥科, 陈浩, 赵述龙. 大规模固定翼无人机集群编队控制方法 [J]. 控制与决策, 2021, 36 (9): 2063-2073.
- [12] YAN J, YU Y, WANG X. Distance-based formation control for fixed-wing UAVs with input constraints: a low gain method [J]. Drones, 2022, 6 (7): 159.
- [13] ZIQUAN Y, ZHANG Y, JIANG B, et al. A review on fault-tolerant cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35 (1): 1-18.
- [14] DING Y, WANG X, CONG Y, et al. Scalability analysis of algebraic graph-based multi-UAVs formation control [J]. IEEE Access, 2019, 7: 129719-129733.