

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104613

基于单目视觉的机械臂灯具清洗定位系统*

董慧芬 严 力 孙浩远
(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

摘 要:在机场嵌入式助航灯具自动清洗过程中,为了取得灯具发光口中心和机械臂的相对位置实现机械臂精准定位,设计了基于单目视觉的机械臂灯具清洗定位系统。首先,采用 D-H 法建立机械臂运动学模型;然后,根据夜间灯具发光的强逆光性以及环境干扰,提出一种优化阈值准则和缩小阈值搜索范围的改进 Otsu 算法对图像进行分割,再利用质心法提取灯具发光口中心位置;最后,在夜间条件下,进行实验分析并对定位误差采用最小二乘法进行补偿。实验结果表明,所设计的机械臂灯具清洗定位系统速度快、精度高,与传统 Otsu 算法和改进的随机霍夫变换算法相比,定位精度分别提高 72.5% 和 55.5%,且平均定位精度达到 8.7 mm,满足灯具清洗要求。

关键词:单目视觉;助航灯具;改进 Otsu;质心定位;误差补偿

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Manipulator positioning system of lamps cleaning based on monocular vision

Dong Huifen Yan Li Sun Haoyuan
(College of Electronics Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In the automatic cleaning process of embedded aeronautical ground lights in airport, in order to obtain the center of lamps emitting port and the relative position of the manipulator to achieve precise positioning of the manipulator, a positioning system of lamps cleaning for manipulator arm based on monocular vision is designed. Firstly, the kinematics model of the manipulator was established by D-H method. Then, according to the strong backlight characteristics of lamps and environmental interference at night, an improved Otsu algorithm was proposed to segment the image by optimizing the threshold criterion and reducing the search range of threshold, and then the center of mass method was used to extract the center position of the lamps emitting port. Finally, under night conditions, the experiment was analyzed and the least square method was used to compensate the positioning error. The experimental results show that the designed manipulator arm positioning system of lamps cleaning has high speed and high precision. Compared with the traditional Otsu algorithm and the improved random Hough transform algorithm, the positioning accuracy was improved by 72.5% and 55.5% respectively, and the average positioning accuracy reaches 8.7 mm, which meets the requirements of lamp cleaning.

Keywords: monocular vision; navigational lamp; improved otsu; centroid positioning; error compensation

0 引 言

在飞机夜航和跑道能见度较低时,需要机场跑道助航灯具为飞行员提供目视引导信号。然而,在日常的工作中,灯具会受到不同程度的污染,导致其发光的强

度^[1-3]不能达到预期的效果,严重的会影响飞机的起降安全,所以需要对其进行定期的清洗^[4-6]。由于清洗灯具大多在飞机停飞的夜间进行,这增加了灯具发光口中心位置获取的难度。灯具自动清洗是提高清洗效率和减少劳动强度的重要方法,因此设计机械臂清洗定位系统,并准确获取机械臂以及灯具发光口中心点的相对位置信息,

对灯具定位进行清洗具有重要意义和实际价值。

目前机场一般都是采用人工清洗方式,少部分机场会采用半自动化的清洗设备。德国生产的灯具清洗车,需要人工进行灯具定位^[7],定位速度慢,且自由度较低。文献[8]通过对助航灯具金属表面进行检测,可实现灯具定位,但误差较大,稳定性不足。文献[9-10]利用不同的霍夫变换方法,能够有效检测出灯具的中心,但在灯具发光状态时的强逆光状态下,适用性较差。文献[11]对类似灯具形状的微小物体进行定位,在无外界干扰时效果较好,但机场灯具工作环境复杂,此方法抗干扰能力较差。文献[12]通过对光的衰减模型进行分析,再利用分类器进行车灯检测识别,去除了强逆光下的干扰,但实时性较差。综合以上目前的灯具检测定位系统效果较差,而本系统关键在于通过对目标图像的分析,完成目标二维到三维的转换,即机器视觉,也是当下各学者研究的热点。张弛等^[13]在针对多目标工件抓取问题下,利用单目摄像头设计了轮廓Hu不变矩模板匹配法,对工件位姿进行求取,引导机械臂抓取。李国利等^[14]针对果实振荡的特点,利用单目视觉与超声检测结合的果实识别定位方法,使机械臂的采摘成功率大大提高。Guo等^[15]针对在线工件的位姿随机问题,通过边缘和角点检测,实现了工件的识别定位与抓取。闫九祥等^[16]利用模版匹配算法设计拆垛系统,并通过实验,表明了系统的有效性。

故在分析当前助航灯具定位方法精度、速度及普适性较差的基础上,以及对视觉定位的研究下,设计单目视觉的机械臂助航灯具清洗定位系统。先利用D-H法建立机械臂的运动学模型,采用优化阈值准则函数和缩小阈值搜索范围的改进Otsu算法对灯具图像进行分割,再利用质心法求取发光口位置坐标,最后对定位系统进行实验分析,验证系统的准确性和鲁棒性。

1 清洗定位系统方案

清洗定位系统方案主要由机械臂、机械臂控制器、上位机、摄像头组成,如图1所示。

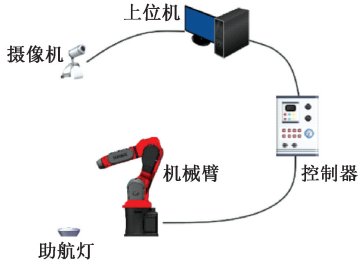


图1 灯具清洗定位方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lighting cleaning and positioning scheme

其中,上位机通过网络接口与机械臂控制器进行通信,并通过USB串口与摄像机连接,而机械臂与控制器通过编码线和驱动线进行通信。上位机通过对摄像机捕捉到的灯具图像进行处理,并提取位置信息,再将此位置信息与机械臂末端位置信息相融合,求得机械臂坐标系下的灯具发光口中心点坐标,最终引导机械臂携带清洗喷头对灯具进行实时精准高效清洗。

2 机械臂运动学模型

所采用的机械臂是6自由度串联机械臂,根据机械臂模型,建立连杆坐标系如图2所示。并得到D-H^[17]参数表如表1所示。

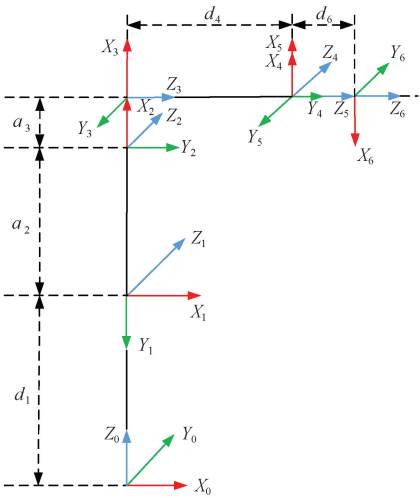


图2 机械臂连杆坐标系

Fig. 2 Robot linkage coordinate system

表1 机械臂D-H参数

Table 1 D-H parameters of manipulator

连杆	θ_i	d_i/mm	a_i/mm	α_i	关节角范围
1	θ_1	449	0	-90°	$\pm 170^\circ$
2	$\theta_2 - 90^\circ$	0	350	0°	$\pm 100^\circ$
3	θ_3	0	50	-90°	$-60^\circ \sim 140^\circ$
4	θ_4	357.5	0	90°	$\pm 180^\circ$
5	θ_5	0	0	-90°	$\pm 115^\circ$
6	$\theta_6 + 180$	165	0	0°	$\pm 360^\circ$

依据坐标系矩阵变换公式:

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由表1数据和坐标系变换公式,可以求得机械臂末

端相对基坐标系的位姿变换矩阵:

$${}^0_6T = {}^0_1T_2 {}^1_2T_3 {}^2_3T_4 {}^3_4T_5 {}^4_5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$$

R 为机械臂基坐标系到末端坐标系的正交变换矩阵。

$P = [p_x, p_y, p_z]^T$ 为机械臂末端位置坐标。

$$a_x = -(c\theta_1 s\theta_{23} c\theta_4 + s\theta_1 s\theta_4) s\theta_5 + c\theta_1 c\theta_{23} c\theta_5 \quad (3)$$

$$a_y = -(s\theta_1 s\theta_{23} c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_4) s\theta_5 + s\theta_1 c\theta_{23} c\theta_5 \quad (4)$$

$$a_z = -c\theta_{23} c\theta_4 s\theta_5 - s\theta_{23} c\theta_5 \quad (5)$$

$$p_x = d_6 [-(c\theta_1 s\theta_{23} c\theta_4 + s\theta_1 s\theta_4) s\theta_5 + c\theta_1 c\theta_{23} c\theta_5] + d_4 c\theta_1 c\theta_{23} + a_3 c\theta_1 s\theta_{23} + a_2 c\theta_1 s\theta_2 \quad (6)$$

$$p_y = d_6 [-(s\theta_1 s\theta_{23} c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_4) s\theta_5 + s\theta_1 c\theta_{23} c\theta_5] + d_4 s\theta_1 c\theta_{23} + a_3 s\theta_1 s\theta_{23} + a_2 s\theta_1 s\theta_2 \quad (7)$$

$$p_z = d_6 [-c\theta_{23} c\theta_4 s\theta_5 - s\theta_{23} c\theta_5] - d_4 s\theta_{23} + a_3 c\theta_{23} + a_2 c\theta_2 + d_1 \quad (8)$$

其中, s 表示 $\sin$, c 表示 $\cos$ 。

3 灯具图像分析及位置获取

灯具清洗主要是对灯具发光口透光镜表面进行清洗,因此准确获取发光口中心点位置非常关键。嵌入式助航灯具在夜间发光时具有以下特性:干扰多,强逆光且发光口与周围区域亮度对比度较大。针对以上问题,先对图像进行二值化处理,再进行滤波去除噪声,最后利用阈值分割算法并进行质心提取,获取发光口中心点位置信息。

3.1 改进 Otsu 图像分割算法

最大类间方差法 Otsu^[18-19] 能够自适应获取图像阈值,对图像进行二值化处理。但对于处在夜间条件下的助航灯具发光图像,灯具目标图像与背景图像分布方差较大,效果甚微,为了快速提取发光口位置信息,提高定位系统精度,重新建立类间方差权重函数,构造新的类间方差判别规则,并将新的类间方差与类内方差结合,作为新的阈值判别条件,最后在灰度直方图中,缩小阈值搜索范围,快速选取最佳阈值。

1) 阈值准则函数

设图像灰度级分布范围是 $[0, L-1]$, 每个灰度级 i 的

像素数是 n_i , N 为总的像素数, $p_i = \frac{n_i}{N}$ 表示灰度级所占比

例,若阈值 T 将目标与背景分成两部分区域, P_0 和 P_1 分别表示目标与背景灰度所占比例, $P_0 = \sum_{i=0}^{T-1} p_i$, $P_1 =$

$\sum_{i=T}^{L-1} p_i = 1 - P_0$, 其灰度平均值分别为:

$$\mu_0 = \frac{1}{P_0} \sum_{i=0}^{T-1} i p_i = \frac{\mu(T)}{P_0} \quad (9)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{P_1} \sum_{i=T}^{L-1} i p_i = \frac{\mu - \mu(T)}{1 - P_0} \quad (10)$$

式中: μ 表示整幅图像的平均灰度值。

$$\mu = \mu_0 P_0 + \mu_1 P_1 \quad (11)$$

则类间方差为:

$$\sigma_B^2 = P_0(\mu_0 - \mu)^2 + P_1(\mu_1 - \mu)^2 = P_0 P_1 (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (12)$$

类内方差为:

$$\sigma_w^2 = P_0 \sigma_0^2 + P_1 \sigma_1^2 \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} \sigma_0^2 = \sum_{i=0}^{T-1} (i - \mu_0)^2 \frac{p_i}{P_0} \\ \sigma_1^2 = \sum_{i=T}^{L-1} (i - \mu_1)^2 \frac{p_i}{P_1} \end{cases} \quad (14)$$

则对应的最佳阈值分别为:

$$\begin{cases} T = \arg_{i \in (0, 1, \dots, L-1)} \max(\sigma_B^2) \\ T = \arg_{i \in (0, 1, \dots, L-1)} \min(\sigma_w^2) \end{cases} \quad (15)$$

为了解决夜间灯具发光口图像与背景图像方差较大,导致获得的阈值将向方差较大的一侧偏移的问题。建立修正项 $\nu(T)$, 则新的阈值准则函数为:

$$\sigma_{WB}^2 = [1 - \nu(T)] [P_0(\mu_0 - \mu)^2 + P_1(\mu_1 - \mu)^2] \quad (16)$$

其中, $\nu(T) = c(T) \cdot \bar{p}(T)$, $c(T) = \frac{2p(T)}{p_L(T) + p_R(T)}$ 为

阈值 T 左右相邻波峰所对应的比例,该项降低了目标灰度分布占比较小从而对阈值选取的影响, $\bar{p}(T) = [p(T-k) + \dots + p(T-1) + p(T) + p(T+1) + \dots + p(T+k)]$ 为阈值 T 邻域内像素所占比例和,此项可以有效补偿夜间发光口与背景相差较大导致的阈值选取误差。 $p(T)$ 为阈值 T 的灰度占比; $p_L(T)$ 和 $p_R(T)$ 为阈值 T 最近的左右波峰对应的灰度占比。

将以上阈值准则与类内方差准则结合,得到的最终阈值准则函数为:

$$\sigma_{WBI}^2 = \frac{\sigma_{WB}^2}{\sigma_1^2} \quad (17)$$

最佳阈值为:

$$T = \arg_{i \in (0, 1, \dots, L-1)} \max(\sigma_{WBI}^2) \quad (18)$$

2) 缩小阈值搜索范围

最大类间方差算法在计算时会遍历所有灰度值,而对于夜间灯具发光图像,其灰度直方图会呈现双波峰情

况,将最佳阈值范围缩小,有利于减少检索时间,提高清洗效率。设图像中灰度范围为 $[\alpha,\beta]$, d_0 和 d_1 分别表示 μ 到 μ_0 和 μ_1 的距离。由于灯具目标图像为高灰度值区域,则:

$$\begin{aligned} d_1 - d_0 &= |\mu - \mu_1| - |\mu - \mu_0| = 2\mu - (\mu_1 + \mu_0) = \\ &= 2 \sum_{i=0}^{L-1} ip_i - \frac{1}{P_0} \sum_{i=0}^{T-1} ip_i - \frac{1}{P_1} \sum_{i=T}^{L-1} ip_i = \\ &= \frac{2P_0P_1 \sum_{i=0}^{L-1} ip_i - P_1 \sum_{i=0}^{T-1} ip_i - P_0 \sum_{i=T}^{L-1} ip_i}{P_0P_1} \end{aligned} \quad (19)$$

将 μ_0P_0 与 μ_1P_1 代入式(19),得出:

$$\begin{aligned} d_1 - d_0 &= \\ &= \frac{(1 - 2P_0)[P_0(\mu_0P_0 + \mu_1P_1) - \mu_0P_0]}{P_0P_1} \end{aligned} \quad (20)$$

将式(11)代入式(20),化简得出:

$$d_1 - d_0 = \frac{(1 - 2P_0)(\mu - \mu_0)}{P_1} \quad (21)$$

由于灯具发光口图像占整图比 $<1/2$,即 $P_0 < 1/2$, $1 - 2P_0 > 0$,且其平均灰度值大于整幅图像的平均灰度值,即 $\mu - \mu_0 > 0$ 。所以推导出 $d_1 - d_0 > 0$,即 $d_1 > d_0$ 。表明 μ 更接近背景范围,最佳阈值处于目标最大值和背景最大值范围内,所以最佳阈值在 $[\mu,\beta]$ 范围内。因此只需遍历该范围内的灰度值,降低了算法时间复杂度,使最佳阈值提取更快速准确。

改进后的算法流程如图3所示。

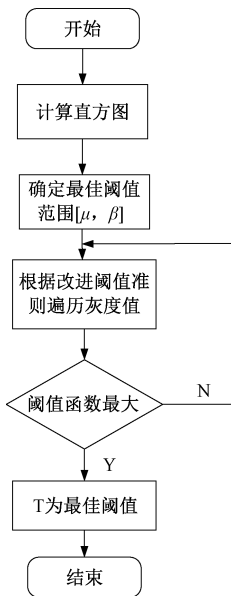


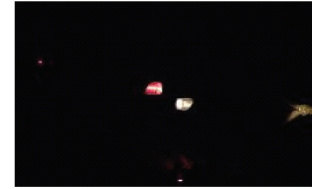
图3 改进 Otsu 算法流程

Fig. 3 Flow chart of the improved Otsu algorithm

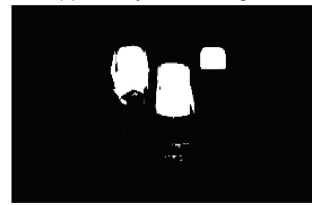
为验证上述算法,在夜间环境下,分别对跑道边灯和跑道中线灯的图像进行分析,如图4所示。



(a) 跑道边灯
(a) Runway side lights



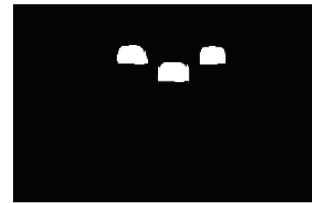
(b) 跑道中线灯
(b) Runway centerline lights



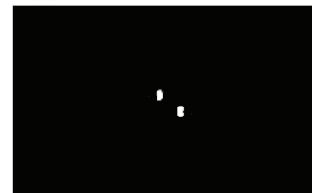
(c) 边灯算法改进前
(c) Before the improvement of the edge lamp algorithm



(d) 中线灯算法改进前
(d) Before the improvement of the center line lamp algorithm



(e) 边灯算法改进后
(e) Improved edge lamp algorithm



(f) 中线灯算法改进后
(f) The center line lamp algorithm is improved

图4 灯具算法处理对比

Fig. 4 Comparison diagram of luminaire algorithm processing

两种算法获取的最佳阈值以及运行时间如表2所示。

表 2 改进算法前后阈值选取和运行时间

Table 2 Threshold selection and running time before and after the improved algorithm

图像	标准 Otsu 算法		改进 Otsu 算法	
	阈值	时间/ms	阈值	时间/ms
跑道边灯	58	2.9	189	1.7
跑道中线灯	41	2.7	162	1.6

由图 4 和表 2 可以看出,改进 Otsu 算法选取的阈值明显增大,且更加合理,可以成功分割出目标图像。同时由于缩小阈值选取范围,运行时间也有所减少,提高了定位的实时性。

3) 发光口位置获取

为了求取发光口中心点世界坐标,先找到像素坐标与世界坐标关系,相机成像模型^[20]如图 5 所示。

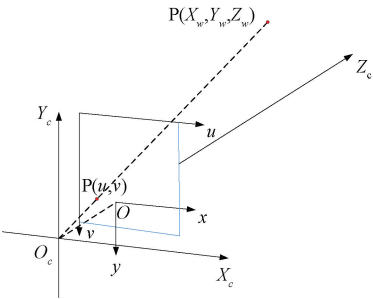


图 5 相机成像模型

Fig. 5 Camera imaging model

其中, (u, v) 是 P 点像素坐标, (x, y) 是图像坐标, (X_c, Y_c, Z_c) 是相机坐标系, (X_w, Y_w, Z_w) 是 P 点世界坐标,根据透视投影关系以及刚体之间的转换关系,可以得到像素坐标和世界坐标之间的转换关系如下:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中, (u_0, v_0) 为图像主像素点坐标; f_x, f_y 为像素点尺寸; $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 分别是旋转矩阵和平移矩阵。

采用平均质心法^[21]求取经过处理后的图像质心,得出发光口中心的像素坐标。 $f(u, v)$ 为轮廓拟合函数,则根据式(23)可求得发光口质心像素坐标。

$$(u_0, v_0) = \left(\frac{\sum uf(u, v)}{\sum f(u, v)}, \frac{\sum vf(u, v)}{\sum f(u, v)} \right) \quad (23)$$

再由式(22)求得发光口中心点世界坐标。

4 系统实验与误差补偿

搭建实验平台,选择相机焦距为 6 mm,分辨率为

1 280×720 pixel,上位机 CPU 为 COREi5,机械臂采用伯朗特 6 轴工业机器人,图像处理开发环境为 Opencv。实验时由于相机位置固定,距地面 1 100 mm,即相机坐标系与机械臂基坐标相对位置固定,由于系统在实际处理过程中,受系统内因和外因影响存在一定的定位误差,为提高系统定位精度,需要进行误差补偿。

4.1 误差补偿

每次移动灯具位置,分别对 X 方向和 Y 方向进行误差补偿。首先保持 Y 方向不变,以其中一个发光口为中心,将其在 X 方向上移动,得到实验数据如表 3 所示。

表 3 X 轴方向坐标误差表

Table 3 X axis coordinate error table

实际 X 坐标/mm	计算 X 坐标/mm	误差/mm
0	-12	12
50	40	10
100	104	4
150	141	9
200	191	9
250	238	12
300	291	11
350	341	9
400	386	14
450	437	13

由表 3 可知,误差在一定范围波动,原因在于相机与物体距离越远,相机内部畸变越大,同时发光口反射光强烈,对灯具识别精度造成影响。为减小误差,对以上数据在 MATLAB 中采用最小二乘法进行数据拟合,得到误差补偿方程为:

$$X_{校正} = 0.987\ 3X_{计算} - 6.436\ 4 \quad (24)$$

同理在 Y 方向进行误差补偿,得到误差补偿方程为:

$$Y_{校正} = 0.985\ 6Y_{计算} + 5.327\ 3 \quad (25)$$

利用式(24)和(25)对系统定位进行补偿,使清洗定位系统更加准确。

4.2 系统实验

系统实验平台如图 6 所示。

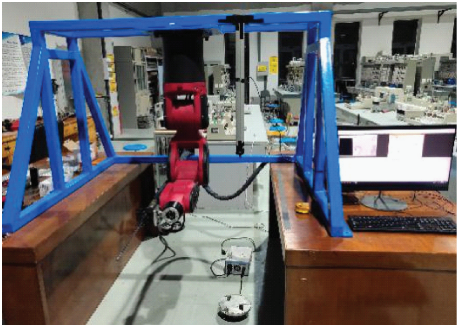


图 6 系统实验平台

Fig. 6 System experiment platform

随机放置灯具位置,分别通过测量得出实际坐标 (x,y) 与经过算法处理和误差补偿后的计算坐标 (x_0,y_0) 对比,得出系统误差。并与改进前的 Otsu 算法以及文献[9]算法进行对比。清洗系统定位计算及校正结果如表4所示。

表4 不同算法下发光口中心坐标计算及校正结果对比

实际坐标 位置	计算坐标			校正坐标		
	改进 Otsu 算法	文献[9]算法	Otsu 算法	改进 Otsu 算法	文献[9]算法	Otsu 算法
(0,0)	(20,-14)	(27,-19)	(34,-22)	(13,-8)	(20,-13)	(27,-16)
(50,-150)	(61,-165)	(66,-171)	(73,-180)	(54,-157)	(59,-163)	(66,-172)
(150,-200)	(165,-211)	(171,-217)	(181,-228)	(156,-203)	(162,-209)	(172,-219)
(200,-300)	(211,-314)	(223,-321)	(238,-330)	(202,-304)	(214,-311)	(229,-320)
(350,-400)	(367,-411)	(375,-419)	(384,-425)	(356,-400)	(364,-408)	(373,-414)
(400,-500)	(422,-520)	(437,-527)	(442,-539)	(410,-507)	(425,-514)	(430,-526)

定义系统误差 e 为校正坐标与实际坐标的欧氏距离,

$$e = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \tag{26}$$

根据式(26)求得3种方法对应系统误差如表5所示。

表5 3种算法下发光口中心坐标系统误差对比

实际坐标 位置/mm	系统误差		
	改进 Otsu 算法	文献[9]算法	Otsu 算法
(0,0)	15.26	23.85	31.38
(50,-150)	7.55	15.81	27.2
(150,-200)	6.71	15	29.07
(200,-300)	4.47	17.8	35.23
(350,-400)	6	16.12	26.93
(400,-500)	12.21	28.65	39.7

分析表4和5中数据可以发现,改进后的 Otsu 算法校正后的 X 轴坐标误差最大为 13 mm,最小误差为 2 mm;校正后的 Y 轴坐标误差最大值为 8 mm,最小值为 0 mm,系统平均误差为 8.7 mm;文献[9]算法校正后的 X 轴坐标误差最大为 25 mm,最小误差为 9 mm;校正后的 Y 轴坐标误差最大值为 14 mm,最小值为 8 mm,系统平均误差为 19.54 mm;改进前 Otsu 算法校正后的 X 轴坐标误差最大为 30 mm,最小误差为 16 mm;校正后的 Y 轴坐标误差最大值为 26 mm,最小值为 14 mm,系统平均误差为 31.59 mm。3种算法误差对比如图7所示。

由图7可以看出,根据发光口自身尺寸大小,长50 mm,宽30 mm,由改进 Otsu 算法计算得到的系统平均误差,比文献[9]算法和改进前 Otsu 算法系统误差都小的多,且满足清洗系统定位要求。

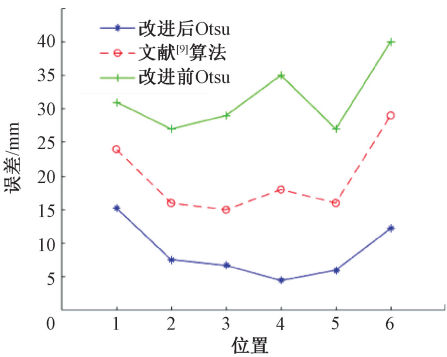


图7 3种算法下系统误差对比
Fig. 7 Comparison of systematic errors under the three algorithms

5 结 论

在对当前助航灯识别及视觉定位研究的基础上,为提高定位速度和精度,设计了一种基于单目视觉的机械臂灯具清洗定位系统。首先建立机械臂运动学模型,采用一种优化阈值准则和范围的改进 Otsu 算法分割图像,再结合相机成像模型,利用质心法获取发光口位置信息。利用6自由度机械臂在夜间条件下进行灯具清洗定位实验并进行误差补偿,对比改进前 Otsu 算法和文献[9]算法,定位精度分别提高72.5%和55.5%,并且可以得出补偿后的平均定位精度为8.7 mm,满足机场灯具清洗要求,同时该系统利用单目视觉算法,能够提高夜间适应性,并增加了系统的鲁棒性和实时性。

参考文献

[1] 贾立山,王立文. 机场助航灯光强动态检测等光强图的绘制[J]. 系统仿真学报,2017,29(5):973-978.
JIA L SH, WANG L W. Airport navigation aid light intensity dynamic detection and other light intensity map drawing[J]. Journal of System Simulation,2017,29(5):

- 973-978.
- [2] AGUNBLADE O Y, NGWIRA S M, ZUVA T. Enhancement optimization of drivable terrain detection system for autonomous robots in light intensity scenario [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(5-8):629-636.
 - [3] 王丙元,张晶晶. 机场助航单灯监控无线传感器网络低能耗路由研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(10): 1438-1444.
WANG B Y, ZHANG J J. Research on low energy routing in airfield navigation aid single light monitoring wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Sensing Technology, 2012, 25(10): 1438-1444.
 - [4] 朱志胜. 民用飞机着陆灯与机场助航灯光在飞机夜航中的作用[J]. 民用飞机设计与研究, 2014(2):88-92.
ZHU ZH SH. The role of civil aircraft landing lights and airport aids lights in aircraft night flight [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2014 (2):88-92.
 - [5] HOU Q Z, YANG B E. Design of optical axis detecting system of airport navigation lights [J]. Transducer & Microsystem Technologies, 2013, 32(2):77-80.
 - [6] 侯启真,张国龙. 基于飞行员视觉的助航灯及其光学特性仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(1): 154-158.
HOU Q ZH, ZHANG G L. Simulation of navigation aids and their optical characteristics based on pilot vision[J]. Computer Simulation, 2013, 30(1):154-158.
 - [7] MEI T Y, HUA C, BO T J, et al. Design and implementation of intelligent floor cleaning car based on embedded system [C]. International Conference on Information Security and Intelligence Control, 2011: 243-245.
 - [8] NIU G C, YUAN J, LIU Y X, et al. Design of cleaning system for aviation embedded aeronautical ground lights[C]. IEEE International Symposium on & Instrumentation Measurement, Sensor Network and Automation, 2014: 2144-2148.
 - [9] GAO Q J, CHENG Q Q, ZHU W Z. Navigation lights online detection method based on improved random Hough transform [C]. International Conference, ACM, 2017.
 - [10] 陈柯宇,曹晓光. 改进的基于梯度场 Hough 变换机场道面地灯检测算法研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(5):112-115,119.
CHEN K Y, CAO X G. Improved ground light detection algorithm for airport road surface based on gradient field hough transform [J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(5):112-115,119.
 - [11] WANG Z J, HUANG X D. Visual positioning of rectangular lead components based on Harris corners and Zernike moments [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(7): 2586-2595.
 - [12] ZHANG W, WU Q M J, WANG G, et al. Tracking and pairing vehicle headlight in night scenes [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1):140-153.
 - [13] 张驰,廖华丽,周军. 基于单目视觉的工业机器人智能抓取系统设计[J]. 机电工程, 2018, 35(3):283-287.
ZHANG CH, LIAO H L, ZHOU J. Design of industrial robot intelligent grasping system based on monocular vision[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2018, 35(3):283-287.
 - [14] 李国利,姬长英,顾宝兴. 基于单目视觉与超声检测的振荡果实采摘识别与定位[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11):1-8.
LI G L, JI CH Y, GU B X. Recognition and localization of oscillating fruit picking based on monocular vision and ultrasonic detection [J] Chinese Journal of Agricultural Machinery, 2015, 46(11):1-8.
 - [15] GUO Q, QUAN Y, ZHU Z. Workpiece posture measurement and intelligent robot grasping based on monocular vision [C]. Eighth International Conference on Measuring Technology & Mechatronics Automation. IEEE Computer Society, 2016.
 - [16] 闫九祥,赵永国,张艳芳,等. 基于单目视觉的工业机器人拆垛系统设计与实验[J]. 机床与液压, 2020, 48(3):18-23.
YAN J X, ZHAO Y G, ZHANG Y F, et al. Design and experiment of industrial robot depalletizing system based on monocular vision [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(3):18-23.
 - [17] 王凤祥,张志杰,陈昊泽. 六自由度机械臂系统设计与控制方式研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(4):1-8.
WANG F X, ZHANG ZH J, CHEN H Z. Design and control of 6-DOF manipulator system [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(4):1-8.
 - [18] 潘峰,孙红霞. 基于蝗虫算法的图像多阈值分割方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1):149-155.
PAN F, SUN H X. Image multi-threshold segmentation method based on locust algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1):149-155.
 - [19] 谢国民,刘宽. 基于形态学滤波和 OTSU 的串联故障电弧识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 46-56.
XIE G M, LIU K. Recognition method of series fault arc based on morphological filtering and OTSU [J]. Journal

- of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(5):46-56.
- [20] 毕德学,王欣亮,刘志芳,等. 机器人工具和相机位姿标定的新方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 101-108.
- BI D X, WANG X L, LIU ZH F, et al. A new method for calibration of robot tools and camera pose [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 101-108.
- [21] 张明富,段梦琨,马月辉. 基于 Fisher 准则的 Otsu 法在光斑中心定位中的应用[J]. 激光与红外, 2020, 50(5):532-537.
- ZHANG M F, DUAN M K, MA Y H. Application of Otsu method based on Fisher criterion to spot center location[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5):532-537.

作者简介



董慧芬, 1992 年于河北工学院获得学士学位, 2002 年于河北工业大学获得硕士学位, 2006 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为中国民航大学副教授, 主要研究方向为智能检测及机器人控制等。

Email: hfdong@cauc.edu.cn

Dong Huifen received her B. Sc. degree from Heilbei University of Technology in 1992, M. Sc. degree from Heilbei

University of Technology in 2002, and Ph. D. degree from Beihang University in 2006. Now she is an associate professor in Civil Aviation University of China. Her main research interests include intelligent detection and robot control etc.



严力, 2016 年于安徽理工大学获得学士学位, 现为中国民航大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理及机器人控制等。

Email: 2856476831@qq.com

Yan Li received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2016. Now he is a M. Sc. candidate at Civil Aviation University of China. His main research interests include image processing and robot control etc.



孙浩远, 2020 年于北京石油化工学院获得学士学位, 现为中国民航大学硕士研究生, 主要研究方向为机器人控制及人工智能等。

Email: damiansuns@163.com

Sun Haoyuan received his B. Sc. degree from Beijing University of Petrochemical Technology in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Civil Aviation University of China. His main research interests include robot control and artificial intelligence etc.