

光笔式单目视觉测量系统的关键技术

解则晓*, 韩振华, 高翔
(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 为了对机械加工部件进行高精度、大尺寸、三维立体空间的现场实时测量, 建立了光笔式单目视觉测量系统。对该系统中的新型光笔工艺、算法转换模型、摄像机焦距的优化、光笔笔尖位置的标定进行了研究。首先提出了一种利用光刻工艺设计制作的新型光笔, 其次, 基于近景摄影测量学中的单像空间后方交会原理, 建立了一种新的光笔坐标系与摄像机坐标系之间的转换模型, 通过最小二乘平差法循环迭代求解最优的单像空间外方位元素, 从而确定了转换模型基本参数。最后, 分析了摄像机焦距对光笔式单目视觉测量系统结果的影响, 并提出了一种确定相对准确焦距和光笔测头在光笔坐标系下的位置的方法。实验结果表明: 摄像机坐标系下 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的稳定性误差分别为 0.042、0.048、0.066 mm; 测量最大误差为 0.173 mm, 较大程度上满足了光笔式单目测量系统稳定性强和精度高的要求。

关键词: 单目视觉测量; 光笔; 光刻工艺; 后方交会; 优化算法

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20130605.0780

Key technologies of monocular vision measurement system with light pen

XIE Ze-xiao*, HAN Zhen-hua, GAO Xiang
(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)
* Corresponding author, E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

Abstract: In order to achieve the high-precision, large-size, three-dimensional space and real-time measurement of mechanical components, a monocular vision measurement system with a light pen was established. The new technology, algorithm converting model, the optimization of camera focal length and the position calibration of the light pen probe were studied. First, a new type of light pen which was designed by using the photolithography process was proposed. Then, based on resection principle of single image space in the close-range photogrammetry, the new conversion relationship between the light pen coordinate system and the camera coordinate system was established. Optimal exterior orientation elements of single image space was solved by least squares adjustment method in the loop iteration, and basic parameters of the transformation model were determined. Finally, the impacts of focal length on the result of monocular vision measurement system were analyzed, and a method to determine the relatively accurate focus length and the position of light pen probe in the coordinate system of the light pen was proposed. Experimental results indicate that the stability errors in the x -

收稿日期: 2013-07-21; 修订日期: 2013-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61171162); 教育部博士点专项基金资助项目 (No. 20110132110010)

axis, y -axis, z -axis directions of the camera coordinate system are 0.042 733 mm, 0.048 513 mm and 0.066 39 mm, respectively, and the maximum measuring error is 0.173 mm. These results meet the requirements of monocular vision measurement system with a light pen for stability and high accuracy.

Key words: monocular vision measurement; light pen; photolithography; resection; optimization algorithm

1 引言

随着现代制造业的快速发展,对大型工件的测量提出了愈来愈高的要求,其中坐标测量技术在航空航天、汽车等机械工业领域有着重要应用。由于其产品一般大而重,往往需要进行现场测量,而传统的测量系统如三坐标测量机,由于其体积大而笨重,测量空间相对有限,已经无法满足实际现场测量的需要^[1]。目前,测量技术分为接触式测量与非接触式测量两种。接触式测量具有精度高、效率低、范围有限等特点,非接触式测量速度快、范围较大,但精度相对较低。其中视觉测量主要分为:单目视觉测量、双目视觉测量、结构光视觉测量等。结构光由于光源的特点限制,应用的场合比较固定;双目视觉难点在于特征点的匹配,两个相机相对位置关系的变化容易影响到测量的精度,其理论研究的重点集中于特征点的匹配上;因单目视觉结构简单,运算速度快而具有广阔的应用前景^[2-5]。结合上述测量技术的特点,以光笔为接触工具,光笔上发光点作为目标点,利用单摄像头提取目标点坐标,组建的视觉测量系统得到越来越广泛的应用。该测量系统具有易便携、效率高、测量范围较广等特点,同时对被测物体表面要求不高,测量精度相对较高。

近年来,在美国、瑞士和挪威等国家,光笔式视觉测量系统的研究取得了很大进展,并有相关产品推出,应用于测量和装配现场^[6]。最有代表性的产品是挪威麦卓诺公司的 Solo 光笔测量仪。由于专利技术的保密性以及产品价格昂贵,对其进行相关技术的研究以推广其应用范围很有必要。在国内,以三点共线为模型建立起来的单摄像头三维视觉测量系统,为研制自主知识产权的便携式三坐标测量打下了基础。

本文针对影响光笔式单目视觉测量系统精度的因素,设计了一种带有新型特征点的光笔,改进

亮点中心坐标提取的图像处理方法,根据近景摄影测量学中后方交会的原理,建立了新的光笔坐标系和摄像机坐标系之间的转换模型,采用最小二乘平差法对转换模型的进行求解,同时提出了一种单目视觉系统标定光笔测头位置和优化相机焦距的方法。实验表明:上述关键技术的应用很好地提升了整个测量系统的精度,具有较高的实用价值。

2 系统结构与新型光笔工艺

2.1 系统结构组成

光笔式单目视觉测量系统包括硬件和软件两部分。其中硬件部分如图 1 所示,包括 4 部分:笔记本电脑、CCD 相机、相机支架、带测头的光笔^[7-9]。软件在笔记本电脑上运行,并显示出测量结果。相机通过给光笔亮圆拍照由模拟信号转化为数字信号,通过 USB 接口传输给笔记本电脑,最终由电脑计算出测量结果。

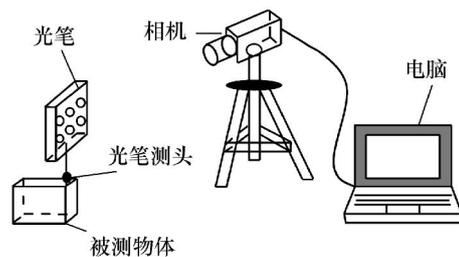


图 1 系统组成结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system components

2.2 新型光笔工艺

光笔特征点^[10]中心坐标的提取精度直接影响最后系统测量的精度。传统的光笔上亮点由标记的 LED 点光源组成,由于点光源发光的均匀性以及关于亮点中心的对称性较差,点光源成像中心的提取成为限制系统精度提高的重要因素。本文中提出了一种利用光刻工艺制作的新型光笔,

该光笔以一平面度好、透射率高、热膨胀系数小的玻璃作为基板,通过光刻加工使标准间距的同一大小的透光圆形图案均匀分布在基板上,每个透光圆形中心下面设置一个点光源。光刻工艺使相邻圆形图案中心间距制作最大误差保持在 $1\ \mu\text{m}$,很好地保证了图像处理时亮点中心坐标的提取精度。图2为新光笔实物图。

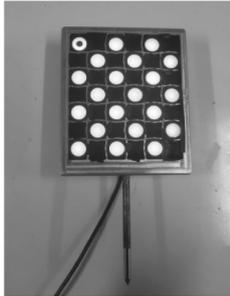


图2 光笔实物图

Fig. 2 Physical map of the light pen

图3是光笔中一个亮圆成像的放大图,可以看出亮圆成像灰度具有比较好的均匀性和中心对称性。

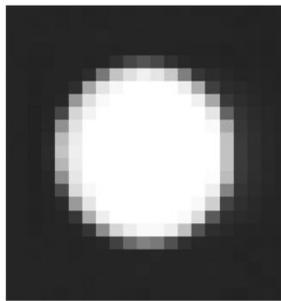


图3 光笔亮圆成像图

Fig. 3 Imaging figure of light pen's light round

2.3 亮圆成像中心坐标提取

本文对亮圆特征点成像中心采取亚像素边缘提取拟合椭圆的方法^[11],保证了软件提取的精度。首先根据亮圆特征点边缘灰度差变化呈高斯分布的特征,如图4所示,获取精确的亚像素边缘点,用“曲率滤波”方法滤除亚像素边缘点中的“孤立点”,最后用最小二乘法对滤波后的亚像素边缘点进行椭圆拟合^[12],求得精确的椭圆圆心。

在图4中边缘点 P 代号为0,灰度差为 f_0 ,其

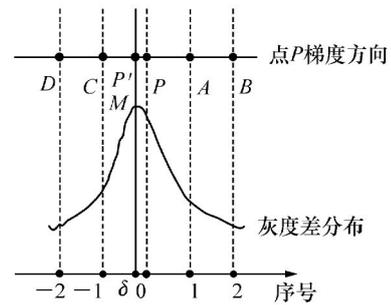


图4 高斯曲线拟合原理图

Fig. 4 Block diagram of Gaussian curve fitting

邻近点 D, C, A, B 代号分别为 $-2, -1, 1, 2$ 。相应灰度差值为 f_{-2}, f_{-1}, f_1 和 f_2 。将灰度差值代入式(1),便可以得到 P 和 P' 相应的距离差,则亚像素边缘点 P' 坐标为 $(x_p + \delta_x, y_p + \delta_y)$:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 0.1 \ln f_{-2} + 0.05 \ln f_{-1} - 0.05 \ln f_1 - 0.1 \ln f_2 \\ \delta_2 &= 0.1429 \ln f_{-2} - 0.0714 \ln f_{-1} - 0.01429 \ln f_0 - \\ &\quad 0.0714 \ln f_1 + 0.01429 \ln f_2 \\ \delta &= \delta_1 / \delta_2. \end{aligned} \quad (1)$$

然后根据亚像素边缘点求取曲率,剔除曲率突增对应的边缘点,最后再拟合剩余边缘点求椭圆的中心坐标。

3 光笔和摄像机坐标系间模型转换

3.1 模型建立

摄像机坐标系和光笔坐标系空间相对位置模型如图5所示,摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$, 建立在成像面 P 上的摄像机相面坐标系 oxy , 光笔坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$, 建立在光笔面上,随着光笔位置的变化而变化。

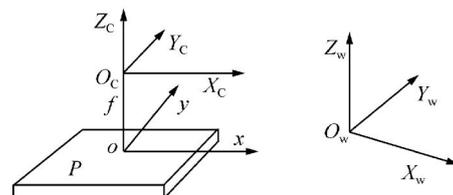


图5 坐标系间相对位置模型图

Fig. 5 Model diagram of coordinate system relative position

于是可以建立从摄像机坐标系到光笔坐标系的变换:

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \mathbf{T} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{R} 是一个旋转正交矩阵, \mathbf{T} 是平移矢量, $(x,$

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: (x, y) 是经过畸变修正后的像点在摄像机相面坐标系下的坐标, (X, Y) 是光笔上的特征点在世界坐标系下的坐标, (Z_s, Y_s, X_s) 是摄像机坐标系的原点在光笔坐标系下的坐标,为待求值。正交旋转矩阵 \mathbf{R} 中只有 3 个独立未知变量。因此,上述共线方程式只需 3 个点相应的坐标就可以求出未知解,为了提高系统的精度和冗余性,本文中采用 20 个特征标点进行求解。

求解转换模型:本文通过求解间接平差来确定单像空间后方交会的外方位元素即共线方程式中的 6 个独立未知数。

设有误差方程:

$$V = AX - L, \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} V &= (v_x \ v_y)^T \\ A &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{pmatrix} \\ X &= (dX_s \ dY_s \ dZ_s \ d\varphi \ d\omega \ d\kappa)^T \\ L &= [x - (x) \ y - (y)]^T. \end{aligned}$$

根据最小二乘间接平差原理,由误差方程可列出法方程式为:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L}, \quad (5)$$

式中, \mathbf{P} 为观测值矩阵,由此得到法方程的解为: $\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L}$ 。

具体计算过程如下:

(1) 确定未知数初始值。

$y, z)$ 为特征点在相机坐标系下坐标。

3.2 转换模型求解

基于近景摄影测量学中单像空间后方交会原理确定光笔式单目视觉测量系统的转换模型^[13]。在近景摄影测量中特征点和其相应的像点坐标满足下列共线方程式:

$$\begin{aligned} X_s^0 &= \frac{\sum X}{n}, \quad Y_s^0 = \frac{\sum Y}{n}, \\ Z_s^0 &= mf + \frac{1}{n} \sum Z, \\ \varphi^0 &= \omega^0 = \kappa^0 = 0 \end{aligned}$$

式中: m 为摄影比例尺寸分母, n 为控制点个数。

(2) 计算旋转矩阵 \mathbf{R} 并逐点计算像点坐标近似值 $(x), (y)$ 。

(3) 计算误差方程系数和常数项并组成误差方程。

(4) 计算法方程的系数矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 和常数项 $\mathbf{A}^T \mathbf{L}$, 组成法方程。

(5) 根据解法方程求各元素的改正数: $dX_s, dY_s, dZ_s, d\varphi, d\omega, d\kappa$ 。

(6) 由上次迭代取得的近似值加本次迭代的改正数计算各元素的新值:

$$\begin{aligned} X_s^j &= X_s^{j-1} + dX_s^j & \varphi^j &= \varphi^{j-1} + d\varphi \\ Y_s^j &= Y_s^{j-1} + dY_s^j & \omega^j &= \omega^{j-1} + d\omega \\ Z_s^j &= Z_s^{j-1} + dZ_s^j & \kappa^j &= \kappa^{j-1} + d\kappa \end{aligned}$$

J 是迭代次数。

(7) 将求得各元素改正数和规定限差比较,判断迭代是否可以结束,否则返回 2) 继续迭代。从光笔坐标系转化为摄像机坐标系的变换为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}. \quad (6)$$

把已求得的参数和光笔测头在光笔坐标系下

的坐标代入上式就可以求出光笔测头在摄像机坐标系的坐标。

4 优化相机焦距和光笔测头位置

本文中光笔坐标系原点建立在距光笔笔尖最近的特征亮圆的中心位置,单纯机械加工并不能确定光笔笔尖在光笔坐标系内的精确位置。设 (x_o, y_o, z_o) 为光笔坐标系的原点在摄像机坐标系下的坐标。则有:

$$\begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}. \quad (7)$$

设光笔测头中心在光笔坐标系下坐标为 (x_d, y_d, z_d) ,在摄像机坐标系下坐标为 (x_c, y_c, z_c) ,则有式(8)。

根据摄像机小孔成像原理可知:测量系统中相机的焦距 f 对测量结果对摄像机坐标系 z 轴方向的分量影响最大,本文将标准长度的条块放置在近似平行于摄像机坐标系的 z 轴方向,进行标定操作,保证了优化算法的约束条件和 f 之间的灵敏性,从而可以得到更高精度的 f 。标准长度条块是一个刚性比较好的金属长条,在标准刻度两端各有一个锥形槽,每次测量都使光笔笔尖放置在锥形槽内,以保证笔尖和标准尺度端点精密重合。

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{pmatrix}. \quad (8)$$

具体操作是:

首先使标准条块在摄像机视场三维立体空间内近似平行移动9个位置,对于标准条块的每个位置,系统都要提取出光笔前后两个位置的成像点坐标。然后以焦距 f 和光笔测头在光笔坐标系下坐标 (x_c, y_c, z_c) 为待优化的参数。目标函数为:

$$F_{\min}(f, x_c, y_c, z_c) = \Delta l = \sum_{i=1}^{i=18} |l_i - l|. \quad (9)$$

运用优化算法例如 Levenberg-Marquardt 法进行求解, l 为标准条块的长度, l_i 是系统测量的光

笔笔尖在前后相应两个位置的间距。本系统标定结果为: $f = 8.229\ 01\ \text{mm}$, $x_d = 12.203\ \text{mm}$, $y_d = 187.125\ \text{mm}$, $z_d = 11.133\ \text{mm}$ 。操作示意图和设备图见图6、图7。

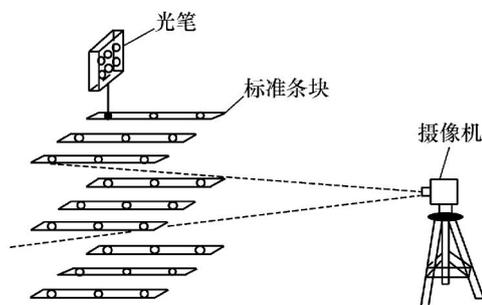


图6 标定操作示意图

Fig. 6 Operation diagram of calibration

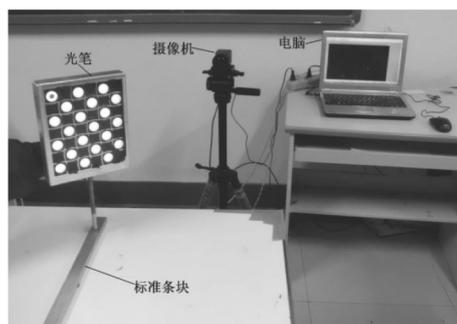


图7 设备实物图

Fig. 7 Physical map of equipment

5 实验和数据分析

本文实验用的相机为瑞士 Photonfocus 公司的工业相机,型号 DS1-D1024-40,分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$,像素尺寸为 $10.6\ \mu\text{m} \times 10.6\ \mu\text{m}$ 。所用镜头为 KOWA 的 LM8HC 镜头,焦距标称值为 $8.0\ \text{mm}$ 。光笔相邻亮圆中心间距为 $52\ \text{mm}$ 。

5.1 固定点重复性测试

从表1中可以看出摄像机坐标系下 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的稳定状态时的误差分别为 $0.042\ 733\ \text{m}$ 、 $0.048\ 513\ \text{mm}$ 、 $0.066\ 39\ \text{mm}$ 。可见系统的稳定性比较好。影响系统稳定性的因素主要有外界条件的变化、相机参数及本身的噪声、图像的处理等。

表 1 固定点重复测量数据

Tab.1 Repeated measuring data of fixed point

测量次数	光笔测头中心的三维坐标/mm		
	x_c	y_c	z_c
1	287.474 292	168.911 495	-1586.526 754
2	287.512 276	168.932 545	-1586.580 759
3	287.554 510	168.907 978	-1586.531 433
4	287.494 227	168.925 999	-1586.535 394
⋮	⋮	⋮	⋮
97	287.537 646	168.942 213	-1586.605 807
98	287.526 649	168.939 958	-1586.576 364
99	287.484 346	168.985 812	-1586.582 196
100	287.522 240	168.952 388	-1586.504 822
平均值	287.517 025	168.937 299	-1586.539 417
最大误差	0.042 733	0.048 513	0.066 39

5.2 标准长度测量实验

采用标准长度大小的条块在摄像机有效视场内,即如图 8 所示的三维立体空间内进行不同摆放位置的测量,三维立体空间距离摄像机在 1 ~ 2 m。条块的标准长度是 393、786 mm。6 个典型方位的测量结果如表 2 所示,测量空间示意图如图 8 所示。

从表 2 中可以看出,系统测量误差保持在 0.173 mm 以内。影响系统测量误差的因素主要有相机的参数、外界条件变化、图像处理、以及人为随机因素等。

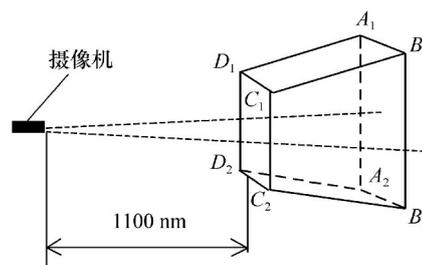


图 8 测量空间示意图

Fig. 8 Diagram of measurement space

表 2 空间测量标准条块的实验结果

Tab.2 Experiment results of space measurement standard bar

次数	mm					
	C_1D_1	C_1B_1	C_1C_2	A_1B_2	A_1A_2	A_1D_2
1	393.147	786.015	393.066	786.016	786.134	786.128
2	392.984	786.015	393.104	785.998	786.051	786.044
3	393.112	785.888	393.118	786.008	786.132	786.135
4	393.131	786.143	392.827	785.885	786.112	785.854
5	393.001	786.133	393.151	786.131	785.891	785.837
6	393.128	785.998	393.173	786.015	786.064	786.097
7	392.966	786.008	393.163	786.286	786.003	786.010
8	393.140	786.096	393.145	786.063	785.877	785.971
9	392.959	785.974	393.107	786.173	786.118	786.005
10	393.113	786.013	392.974	785.895	786.100	786.162
最大误差	0.147	0.143	0.173	0.134	0.132	0.163

6 结 论

本文针对影响光笔式单目视觉测量系统精度的因素,设计了一种新型光笔,很好地保证了特征点成像中心的提取精度。同时基于摄影测量学中的后方交会原理,建立了新的坐标系间转换模型,

通过后方交会迭代算法求解实现了系统整体模型的坐标转换。最后,提出了光笔笔尖位置标定和优化摄像机焦距的方法。这些方法的提出和应用使得整个系统稳定性和精度有了大幅度的提升,实验证明:该系统的测量误差最大为0.173 mm,具有较大的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 解则晓,孙洪磊,王晓敏. 光笔式双摄像机三维坐标视觉测量系统[J]. 光学技术,2012,38(4):459-461.
XIE Z X, SUN H L, WANG X M. Study of the two-light pen-camera type 3D-coordinate measuring system[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(4):459-461. (in Chinese)
- [2] 韩廷祥,张志胜,戴敏. 基于特征点的单目视觉测量方法[J]. 光学精密工程,2011,19(5):1111-1115.
HAN Y X, ZHANG ZH SH, DAI M. Monocular vision system for distance measurement based on feature points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1111-1115. (in Chinese)
- [3] 黄风山,刘书桂,彭凯. 光笔式视觉测量中被测特征点像面坐标提取方法的研究[J]. 机床与液压,2005,(10):123-125.
HUANG F SH, LIU SH G, PENG K. Study of pick-up of coordinates of features-points in an image captured in the lightpen vision measurement[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2005, (10):123-125. (in Chinese)
- [4] 刘建伟,梁晋,梁新合,等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程,2010,11(1):127-129.
LIU J W, LIANG J, LIANG X H, et al. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 11(1):127-129. (in Chinese)
- [5] 敬泽,薛方正,李祖枢. 基于单目视觉的空间目标位置测量[J]. 传感器与微系统,2011,30(3):125-130.
JING Z, XUE F ZH, LI Z SH. Space target location measurement based on monocular vision[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(3):125-130. (in Chinese)
- [6] 黄风山,刘书桂,彭凯,等. 光笔视觉测量系统结构参数的自标定与仿真[J]. 光电子·激光,2006,17(6):706-708.
HUANG F SH, LIU SH G, PENG K, et al. Self-calibration and simulation of the structure parameters in a light pen vision measurement system[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(6):706-708. (in Chinese)
- [7] 黄风山,王春梅. 光笔式视觉坐标测量中控制点光斑图像的识别[J]. 光学精密工程,2007,15(4):588-591.
HUANG F SH, WANG CH M. Control points' light spot image recognition in light pen vision coordinate measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4):588-591. (in Chinese)
- [8] XU T F, ZHAO P. Precise perimeter measurement for 3D object with a light-pen vision measurement system[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, 4(1):815-819.
- [9] XU T F, ZHAO P. Precise center location for light spot contour image of light emitting diode control points in light-pen vision coordinate measurement[J]. *Optics Eng.*, 2008, 47(12):123602-1-9.
- [10] 刘长英,高乐,高印寒,等. 单目视觉坐标测量方法[J]. 吉林大学学报,2010,4(5):1279-1282.
LIU CH Y, GAO L, GAO Y H, et al. Measurement of coordinates by single-camera vision[J]. *J. Jilin University*, 2010, 4(5):1279-1282. (in Chinese)
- [11] 张之江,车仁生,黄庆成,等. 测头成像视觉坐标测量系统中特征点成像中心获取[J]. 光学精密工程,1998,6(5):13-16.
ZHANG ZH J, CHE R SH, HUANG Q CH, et al. Centroid of characteristic point image obtain in probe imaging vision coordinate measuring system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5):13-16. (in Chinese)
- [12] 张虎,达飞鹏,邢德奎. 光学测量中椭圆圆心定位算法研究[J]. 应用光学,2008,29(6):905-911.
ZHANG H, DA F P, XING D K. Algorithm of centre location of ellipse in optical measurement[J]. *J. Appl. Optics*, 2008, 29(6):905-911. (in Chinese)
- [13] 林君建,苍桂华. 摄影测量学[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

LIN J J, CANG G H. *Photogrammetry*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)

作者简介:



解则晓(1968—),男,山东临沂人,博士,教授,博士生导师,1997年于大连理工大学获得硕士学位,2000年于天津大学获得博士学位,现为中国海洋大学工程学院副院长,主要从事机器视觉和机器人运动控制及机器人测量方面的研究。E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn



高翔(1989—),男,山东莒南人,硕士研究生,2008年于中国海洋大学获得学士学位,主要从事机器视觉测量技术、图像处理方向研究。E-mail: gx_whz@yeah.net



韩振华(1986—),男,河南濮阳人,硕士研究生,2010年于中国石油大学获得学士学位,主要从事机器视觉测量技术、图像处理方向研究。E-mail: hanzhenhuakuai_le@126.com

《发光学报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号:CN 22-1116/04

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:12-312

国外发行代号:4863BM

http://www.fgxb.org