

文章编号:1008-1542(2015)05-0467-07

doi:10.7535/hbkd.2015yx05004

结构光三维角度测量系统位姿参数优化研究

丁 洵,赵前程,王 宪,赵亚峰

(湖南科技大学机电工程学院,湖南湘潭 411201)

摘 要:为提高结构光目标角度测量的精度,对结构光系统结构参数与角度测量精度的关系进行了研究。首先,从结构光测量原理出发,分析了影响角度测量精度的主要系统结构参数;其次,对结构参数影响角度测量精度的规律进行了仿真研究,提出了优化的结构参数取值范围;最后,通过实验证明:该优化参数可有效提高转角测量精度,为后续基于结构光的 3D 四轮定位仪的改进方案奠定设计基础。

关键词:视觉测量;结构光;角度;结构参数优化;图像采集

中图分类号:TK172 **文献标志码:**A

Posture parameters optimization of a structured light 3D angle measuring system

DING Xun, ZHAO Qiancheng, WANG Xian, ZHAO Yafeng

(School of Mechatronic Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: To improve the measurement precision of the structured light target angle, this paper studies the relation between the structured light system parameters and measurement accuracy of the angle. Firstly, the main system structure parameters influencing the angle measurement precision are analyzed based on the structured light measurement principle; secondly, simulation research on the laws of how the structured parameters influence the angle measurement precision are conducted, and the optimized range of values of the structured parameters is proposed; finally, the experimental studies show that, the optimized parameters can improve the angle measurement precision effectively, which lays the design foundation for later improvement schemes of the structured light 3D four-wheel alignment instrument.

Keywords: visual measurement; structured light; angle; structure parameter optimization; image capture

视觉测量方法以非接触、精度高等特性在工业环境得到了广泛应用^[1-4]。常用的视觉测量方法有单目视觉测量^[5]、双目视觉测量^[6-7]、结构光视觉测量^[8-9]等。视觉传感器是视觉测量系统获取信息来源的关键部分,其测量精度与性能对总体检测系统的可靠性和总体测量精度有直接影响。其中,系统结构参数是否合理是影响视觉测量精度的一个关键因素。在单目视觉测量中,王鹏等^[10]通过引入标定点与摄像机光学中心的

收稿日期:2015-03-25;修回日期:2015-05-10;责任编辑:李 穆

基金项目:国家自然科学基金(51275169,51405154);湖南省自然科学基金(2015JJ5012);中国博士后科学基金(2012T50497);湖南科技大学研究生创新基金(S140019)

作者简介:丁 洵(1989—),女,湖南湘潭人,硕士研究生,主要从事视觉测量方面的研究。

通讯作者:王 宪博士。E-mail:1030114@hnust.edu.cn

丁 洵,赵前程,王 宪,等. 结构光三维角度测量系统位姿参数优化研究[J]. 河北科技大学学报,2015,36(5):467-473.

DING Xun, ZHAO Qiancheng, WANG Xian, et al. Posture parameters optimization of a structured light 3D angle measuring system[J].

Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(5): 467-473.

间距建立位姿测量模型,将该模型进行线性处理,最后对所得线性方程求解实现位姿参数优化。王以忠等^[11]建立了双目立体视觉测量模型的精度与传感器结果参数之间的回归方程,通过对模型优化求解实现双目立体视觉传感器的结构参数优化。吴彰良等^[12]通过建立空间待测点与结构光传感器结构参数关系的数学模型进而分析并优化结构参数,但该法仅适用于激光三角测量模型^[13],反映问题不够完善。

本文主要通过建立结构光线面成像测量数学模型,研究其测量误差与各结构参数之间的关系,通过仿真实现对十字结构光传感器结构参数的优化,结合实际实验分析证明优化参数的有效性。

1 模型构建和影响因素分析

结合结构光目标位姿测量原理^[14]建立结构光视觉转角测量模型,分析出对影响测量结果的各种因素,并对影响因素进行后续仿真分析,观察对测量结果的影响程度。

1.1 模型构建

结构光视觉测量数学模型如图1所示,局部坐标系 $O_g - X_g Y_g Z_g$ 与相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 重合且均为右手坐标系。激光器出射原点为 N , O_c 为相机光轴中心。结构光光平面的出射点 N 在 $O_c X_c Z_c$ 坐标平面上,且结构光平面正交于 $O_c X_c Z_c$ 坐标平面。交线为 PN , P 点为光轴 $O_c Z_c$ 与结构光平面的交点,光平面出射点 N 点与摄像机光心 O_c 点之间的距离,即结构光视觉测量系统的基线距离 $|NO_c| = D$,结构光平面与基线距离之间的夹角 $\angle PNO_c = \alpha$,光轴与激光射线之间的夹角 $\angle O_c PN = \beta$ 。

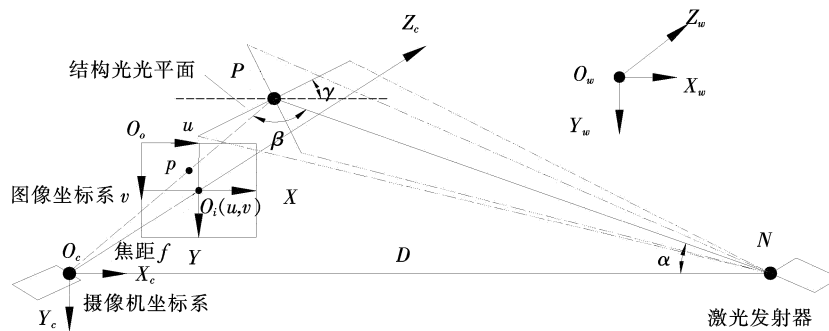


图1 结构光视觉测量数学模型

Fig. 1 Structure light vision measuring model

在模型中,各坐标值统一于局部坐标系 $O_g - X_g Y_g Z_g$ 内,由局部坐标系内物坐标转换至图像坐标系中像点的投影模型为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中: $s=1$, $\mathbf{0}^T=(0\ 0\ 0)^T$, \mathbf{R} 为 3×3 的单位正交矩阵, \mathbf{t} 为 1×3 的平移矢量。由 D, α 及 β 组成的具有明确物理意义的结构参数描述的结构光光平面方程为

$$\cot(\alpha + \beta) \cdot x_g + z_g - \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} D = 0. \tag{2}$$

由投影模型(1)和光平面方程(2),可得结构光视觉测量模型见式(3):

$$\begin{cases} x_g = z_g \frac{u}{f}, \\ y_g = z_g \frac{v}{f}, \\ z_g = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} D \cdot \frac{1}{\frac{u}{f} \cdot \cot \beta + 1}. \end{cases} \tag{3}$$

由式(3)可知,物点坐标值的精确求取与相机内参中的焦距 f 、基距线 D 、物点射线与基距线夹角 α 和光轴与基距线夹角 β 紧密相关。

设 (X_g, Y_g, Z_g) 为待测物上一个特征光条点的世界坐标,用 $m(m>3)$ 个参考点构建超定方程组为

$$\begin{bmatrix} X_{g1} & Y_{g1} & Z_{g1} \\ X_{g2} & Y_{g2} & Z_{g2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{gm} & Y_{gm} & Z_{gm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

解式(4)可得 A_1, B_1, C_1 的最小二乘解,即得该拟合平面的法向量 $\bar{n}_1 = [A_1 \ B_1 \ C_1]$,转动待测物后,同理可求得转动平面法向量 $\bar{n}_2 = [A_2 \ B_2 \ C_2]$ 。由平面夹角 θ 的定义可得:

$$\theta = |\arccos(\bar{n}_1, \bar{n}_2)| = \frac{|A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \cdot \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} \quad (5)$$

式(5)中平面法向量 \bar{n}_1, \bar{n}_2 已知,至此可得平面转动角度 θ 。

1.2 影响因素分析

由式(4)和式(5)可知,平面转角 θ 的精度取决于结构光视觉测量模型中参考点坐标的求取精度,因此对影响特征点求取的因素进行分析。先对结构光测量解析式(3)进行全微分运算,用 ϵ_u 和 ϵ_v 来表示二维图像坐标系内光条特征点 (u, v) 的定位误差,设 $\frac{\partial X_g}{f} = M$ 为放大倍率。由光条特征像点 (u, v) 的定位误差引起的视觉测量误差为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{X_g} \\ \epsilon_{Y_g} \\ \epsilon_{Z_g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_g}{\partial u_i} & \frac{\partial X_g}{\partial v_i} \\ \frac{\partial Y_g}{\partial u_i} & \frac{\partial Y_g}{\partial v_i} \\ \frac{\partial Z_g}{\partial u_i} & \frac{\partial Z_g}{\partial v_i} \end{bmatrix} \cdot [\epsilon_u \ \epsilon_v]^T = \begin{bmatrix} \frac{f \cdot \sin \beta M^2 \epsilon_u}{D \cdot \sin \alpha} \\ -\frac{f \cdot v \cdot \cos \beta M^2 \epsilon_u + M \epsilon_v}{D \cdot \sin \alpha} \\ -\frac{f \cdot \cos \beta M^2 \epsilon_u}{D \cdot \sin \alpha} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)知,影响十字结构光视觉系统测量精度的因素除光条特征点定位误差外,还有焦距 f 、两夹角 α 和 β 、十字光条转角 γ 和基距线 D 。

2 仿真分析

为了提高结构光测量精度,将上文分析出的影响因素代入模型进行仿真计算,分析出对测量转角的影响程度,再有针对性的进行优化,求得相对合理的结构光视觉测量系统位姿参数。

实验 1:本实验旨在分析测量系统中光条特征点提取误差对结构光测量精度的影响。设定相机内部参数 a_x, a_y 均为 7 000, u_0, v_0 分别为 1 296, 972, 平移矩阵为 $[-82.5, -82.5, 1\ 200]$, 拍摄方格尺寸为 $33\text{ mm} \times 33\text{ mm}$ 的 6×6 棋盘靶标,光条旋转角度为 $\pi/4$, 激光器出射原点 N 与光轴中心 O_c 在局部坐标系 x 轴方向相距 100 mm。

不考虑内参标定的影响,在均值为 0、标准差为 1 的光条特征点定位随机噪声强度下,重复运算 100 次,考察光条特征点提取精度对求解对应空间点坐标的影响程度,与无噪声时对应空间点坐标值对比,结果如表 1 所示。

表 1 仿真测试结果

Tab.1 Results of simulation and test

引入 u, v 的噪声/pixel	光条特征点偏差均值/mm	对应空间点标准差
0.1	0.004 3	0.014 3
0.2	0.018 0	0.028 5
0.3	0.038 3	0.042 2
0.5	0.092 4	0.068 0
0.7	0.145 8	0.091 4
1.0	0.224 2	0.123 0

从表1的仿真结果可以看出,空间点坐标误差与结构光条图像噪声强度同方向变化。因此,提高靶标图像特征点的提取精度,可以相应提高标定精度。

实验2:本实验旨在分析测量系统中相机内部参数对结构光测量精度的影响。在实验1基础上,不引入特征点定位噪声,对内部参数中 a_x, a_y 引入随机噪声,并重复运行100次,结果如表2所示。其中, a_x, a_y 分别为 u, v 轴上归一化焦距。

表2 仿真测试结果

Tab. 2 Results of simulation and test

在内参引入噪声程度/pixel	转角平均偏差/(°)	转角标准差
5	0.077 0	0.005 8
10	-0.283 0	0.015 3
20	0.692 5	0.041 1

实验3:本实验旨在分析测量系统中相机外部参数对结构光测量精度的影响。在实验1的基础上,对外部参数中的平移矢量分别引入随机噪声,并运行100次,测试结果如表3所示。

表3 仿真测试结果

Tab. 3 Results of simulation and test

在外参引入噪声程度/mm	平均偏差/(°)	标准差
0.3	0.167 8	0.060 2
0.5	0.347 0	0.083 0
0.7	0.761 9	0.112 4

由表2和表3实验可以得出,相机内部参数标定误差对系统测量影响程度相对较小,相机外部参数标定误差对测量系统的影响较大。而外部参数与系统硬件设备的摆放姿态密切相关,因此下文对光条转角 γ 、基距线 D 及系统夹角 α, β 的结构参数进行仿真分析。

实验4:在实验1的基础上,不考虑光条中心提取误差,改变出射光条与局部坐标系 x 轴的夹角,即光条转角 γ 在 $[0, \pi/4]$ 范围内,重复计算100次,以考察光条出射夹角对视觉测量系统对角度测量的影响。仿真结果如图2、图3所示。

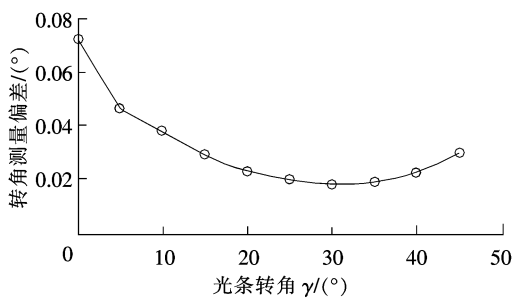


图2 夹角度数对测量角度的偏差

Fig. 2 Residual of measuring angles with the structure of the angle

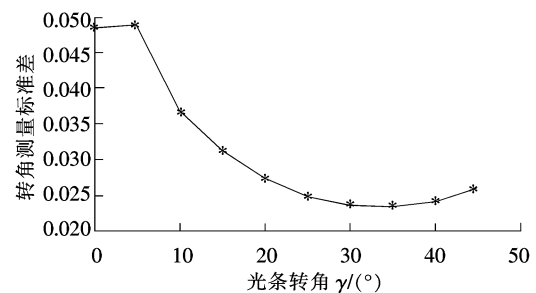


图3 夹角度数对测量角度的标准差

Fig. 3 Deviation of measuring angles with the structure of the angle

从上述结果可知,当激光器转角 γ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围时,角度测量偏差由 $0.072 3^\circ$ 迅速降至 $0.018 5^\circ$;角度标准差由 $0.048 7^\circ$ 缓慢升高至 $0.049 0^\circ$ 后,迅速降低至 $0.023 5^\circ$;当激光器转角 γ 在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 范围时,其角度偏差和标准差随着角度增大而平缓增大。因此,测量系统的出射光条与 x 轴夹角在 $30^\circ \sim 35^\circ$ 范围内,角度的偏差和标准差波动较小,测量精度较高。

实验5:深度方向距离不变时,分别改变激光出射点与相机光心点的 x, y 轴向距离,即相当于改变 D 和系统夹角 α, β 的大小。在随机噪声强度为 0.3 pixel下,重复计算100次,考察激光出射线与光轴的夹角对视觉测量系统角度测量的影响。

如图 4、图 5 所示,激光器与摄像机之间 x 轴距离固定不变,当 y 轴坐标在 $0\sim 100$ mm 范围时,角度测量残差由 0.185° 迅速降至 0.030° ;当 y 轴坐标在 $100\sim 240$ mm 范围内,角度测量残差的变化稳定在 0.02° 左右;当 y 轴坐标在 $240\sim 420$ mm 范围内,角度测量残差平缓增大至 0.505° 。而当 y 轴坐标在 $0\sim 200$ mm 范围时,角度测量标准差呈迅速下降趋势,从 0.059° 降低至 0.020° ;当 y 轴坐标在 $200\sim 420$ mm 范围时,角度测量标准差呈现快速上升趋势,升高至 0.056° 。对于该视觉测量系统的激光出射点与相机光心点的 y 轴向距离在 200 mm 左右,所测得的转角的残差和均方根误差较小,精度较高。

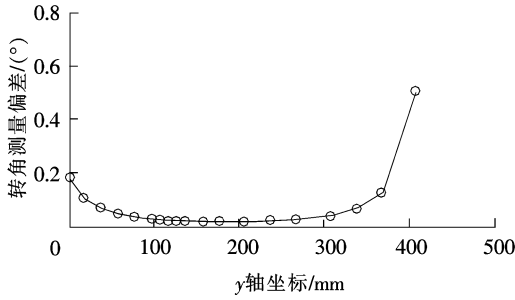


图 4 y 轴向距离对测量角度的偏差

Fig. 4 Residual of measuring angles with y axis distance

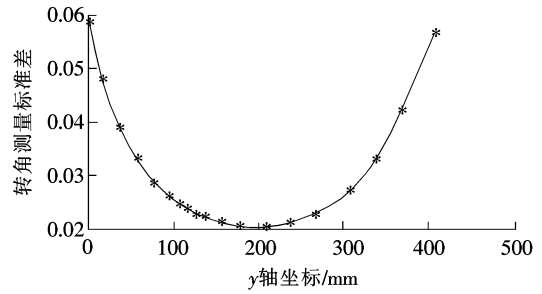


图 5 y 轴向距离对测量角度的标准差

Fig. 5 Deviation of measuring angles with y axis distance

如图 6、图 7 所示,激光器与摄像机之间 y 轴距离固定不变,当激光器在 x 轴坐标 $0\sim 200$ mm 范围移动时,角度测量残差由 1.237° 迅速降至 0.022° ;当 x 轴坐标在 $200\sim 420$ mm 范围时,角度测量残差由 0.022° 平缓降低至 0.006° 左右;当 x 轴坐标在 $420\sim 720$ mm 范围时,角度测量残差平缓下降至 0.002° 。而当 x 轴坐标在 $0\sim 420$ mm 范围时,角度测量标准差呈现迅速下降趋势,从 0.106° 降低至 0.011° ;当 x 轴坐标在 $420\sim 720$ mm 范围时,角度测量标准差呈现平缓降至 0.006° ,并随着 x 轴坐标值的增加,角度的标准差平缓下降, x 轴坐标为 $3\ 000$ mm 时,所测角度标准差为 0.001° 。对于该视觉测量系统的激光出射点与相机光心点的 x 轴向距离越远,其测得角度的残差和标准差越小,即所测得的转角精度越高。

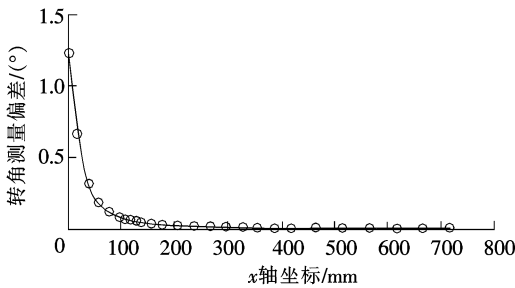


图 6 x 轴向距离对测量角度的偏差

Fig. 6 Residual of measuring angles with x axis distance

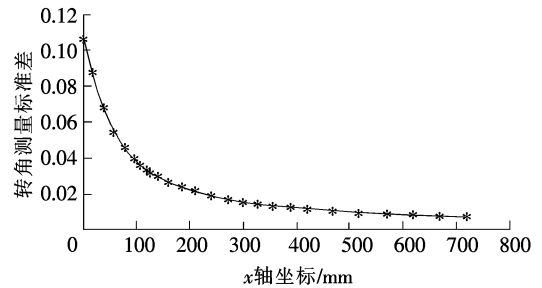


图 7 x 轴向距离对测量角度的标准差

Fig. 7 Deviation of measuring angles with x axis distance

3 实验验证

本实验将仿真实验中得出的结构参数优化范围,应用于实际转角测量,以验证优化范围的可行性。优化前测量实验布置为光条转角 γ 为 5° ,激光发射器相对于相机坐标系的方位为 $[300, 50, 50]$ mm;优化后测量实验布置为光条转角 γ 为 35° ,激光发射器相对于相机坐标系的方位为 $[2\ 500, 200, 50]$ mm,结构光视觉传感器布置如图 8 所示。

实验采用图像分辨率为 $2\ 592\ \text{pixel} \times 1\ 944\ \text{pixel}$ 的工业相机,颜色为红光、输出功率 $100\ \text{mW}$ 、输出波长为 $650\ \text{nm}$ 的十字激光器,特征点个数为 8×8 (特征点间距为 $30\ \text{mm}$) 的棋

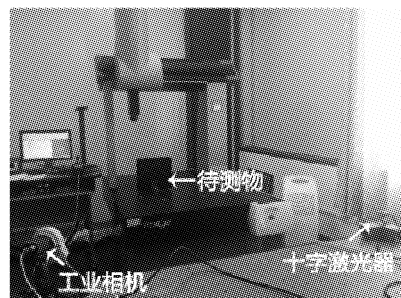


图 8 实验

Fig. 8 Actual experiment

盘格靶标,亮度恒定的LED点阵光源,以及三坐标测量机。视觉系统工作距离在1 500 mm内,测量范围在50 cm×40 cm×50 cm,并在图像采集过程中保持外部环境和各硬件状态稳定。

将提取的光条特征点^[15-17]联立已标定的相机内部^[18-19]参数、光平面^[20]系数,并通过最小二乘拟合获取对应平面法向量。在测量距离为1 200 mm附近,移动并转动平板,可得平板在不同位姿下的夹角,将测量结果统计至表4和表5所示(测量过程中,平板的平面度为0.552 2 mm)。

表4 优化前测量结果对照

Tab.4 Rotated plane angle comparison table with non-optimization

序号	三坐标测得数值/(°)	激光测量系统测得数值/(°)	误差值/(°)
1	26.481 7	26.176 6	0.305 1
2	5.490 0	4.797 9	0.692 1
3	14.931 1	14.611 8	0.319 3
4	17.443 7	17.802 5	-0.358 8
5	9.442 7	9.815 0	-0.372 3
6	2.516 0	3.197 0	-0.681 0

表5 优化后测量结果对照

Tab.5 Rotated plane angle comparison table with optimization

序号	三坐标测得数值/(°)	激光测量系统测得数值/(°)	误差值/(°)
1	7.859 1	7.828 1	0.031 0
2	10.951 2	10.914 8	0.036 4
3	10.616 4	10.556 8	0.059 6
4	7.395 0	7.418 8	-0.023 8
5	21.361 4	21.261 6	0.099 8
6	15.679 1	15.608 2	0.070 9

从上述结果可知,结构光系统测量的误差为0.1°,满足限定的精度要求。该实验结果表明,本文所述的结构光视觉测量系统的位姿进行相关调整,可相对应的减小部分误差。

4 结 论

本文在结构光视觉转角测量模型基础上,对摄像机-激光器位置的几何关系与结构光测量系统误差的影响进行了定性分析,其影响因素为摄像机内部参数、激光发射器参数、两者之间的位姿参数及待测物体与测量系统的距离等,并结合仿真实验对影响因素进行了定量分析结构参数范围。最后,通过实测实验验证了优化调整结构光视觉测量系统的结构参数后,可相应减小部分测量误差,对后续的四轮定位仪上的角度测量提供了理论依据。

参考文献/References:

- [1] LUIS C B P, OLEG Y S, JULIO C R-Q. Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54(3): 159-169.
- [2] 李海华, 文雪平. 基于单目机器视觉的耐火砖检测技术[J]. 河北工业科技, 2013, 30(6): 429-432.
LI Haihua, WEN Xueping. Measurement technology of firebrick based on monocular vision[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2013, 30(6): 429-432.
- [3] PARK J, KIM K. Design of a visual perception model with edge-adaptive Gabor filter and support vector machine for traffic sign detection [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(9): 3679-3687.
- [4] 李春华, 付丽. 3D视频系统的研究与发展[J]. 河北工业科技, 2013, 30(6): 472-478.
LI Chunhua, FU Li. Development of 3DV[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2013, 30(6): 472-478.
- [5] 尹英杰, 徐德, 张正涛, 等. 基于单目视觉的平面测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 347-352.
YIN Yingjie, XU De, ZHANG Zhengtao, et al. Plane measurement based on monocular vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(4): 347-352.
- [6] 郭慧, 刘亚非, 王勇, 等. 大型齿轮工件焊接的双目视觉测量标定[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(4): 455-459.
GUO Hui, LIU Yafei, WANG Yong, et al. Calibration of binocular vision measurement of large gear workpiece welding[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2013, 39(4): 455-459.
- [7] 郝丽娟. 基于双目视觉的三维形貌与形变测量[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
HAO Lijuan. 3D Profile and Deformation Measurement Based on Binocular Vision System[D]. Nanjin: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [8] 李冠楠. 直齿圆柱齿轮渐开线齿廓的结构光视觉测量技术[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

- LI Guannan. Spur Gear Profile Measurement Based on Structured Light System[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [9] BERGH M, CARTON D, de NIJS R, et al. Real-time 3D hand gesture interaction with a robot for understanding directions from humans [C]//Proceedings of RO-MAN. [S.l.]:IEEE, 2011:357-362.
- [10] 王鹏, 孙长库, 张子森, 等. 单目视觉位姿测量的线性求解[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5):1126-1131.
WANG Peng, SUN Changku, ZHANG Zimiao, et al. Linear pose estimation with a monocular vision system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5):1126-1131.
- [11] 王以忠, 李孝猛, 张大克, 等. 双目立体视觉传感器结构参数优化设计[J]. 天津科技大学学报, 2010, 25(3):58-60.
WANG Yizhong, LI Xiaomeng, ZHANG Dake, et al. Optimal design of structural parameters of binocular stereo visual sensor[J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2010, 25(3):58-60.
- [12] 吴彰良, 卢荣胜, 官能刚, 等. 线结构光视觉传感器结构参数优化分析[J]. 传感技术学报, 2004(4):709-712.
WU Zhangliang, LU Rongsheng, GUAN Nenggang, et al. Optimization of the structural parameters of line-structured light visual sensors [J]. Journal of Transduction Technology, 2004(4):709-712.
- [13] 卢晋人, 黄元庆. 激光三角法测量表面形貌[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2004, 43(1):50-53.
LU Jinren, HUANG Yuanqing. Laser triangulation method for surface measurement[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2004, 43(1):50-53.
- [14] 张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社, 2008.
ZHANG Guangjun. Vision Measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [15] 储珺, 郭卢安政, 赵贵花. 采用环形模板的棋盘格角点检测[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1):189-196.
CHU Jun, GUOLU Anzheng, ZHAO Guihua. Chessboard corner detection based on circular template[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1):189-196.
- [16] 张智, 贺显曜, 马亚飞. 基于图像分割的光条中心线提取方法[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(5):1304-1306.
ZHANG Zhi, HE Yuyao, MA Yafei. Method of linear structure light center position extracting based on graph cut[J]. Computer Measurement and Control, 2013, 21(5):1304-1306.
- [17] 尚雅层, 陈静, 田军委. 高斯拟合亚像素边缘检测算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(1):179-181.
SHANG Yaceng, CHEN Jing, TIAN Junwei. Sub-pixel edge detection algorithm based on Gauss fitting[J]. Journal of Computer Application, 2011, 31(1):179-181.
- [18] 王子辰, 戴明, 汪永阳, 等. 一种基于虚拟立体靶标的线阵相机标定方法[J]. 光电子激光, 2013, 24(5):867-873.
WANG Zichen, DAI Ming, WANG Yongyang, et al. A line-scan camera calibration method based on virtual stereo pattern[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013, 24(5):867-873.
- [19] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [20] 陈天飞, 赵吉宾, 吴翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1):0112004-1-0112004-9.
CHEN Tianfei, ZHAO Jibin, WU Xiang. New calibration method for line structured light sensor based on planar target[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1):0112004-1-0112004-9.