

一种基于双目视觉的箭体晃动在线监测方法

薛春岭 张峰 刘炼雄

On-line monitoring method of rocket body sloshing based on binocular vision measurement

XUE Chunling, ZHANG Feng, LIU Lianxiong

引用本文:

薛春岭, 张峰, 刘炼雄. 一种基于双目视觉的箭体晃动在线监测方法[J]. 应用光学, 2022, 43(1): 81–86. DOI: 10.5768/JAO202243.0103002

XUE Chunling, ZHANG Feng, LIU Lianxiong. On-line monitoring method of rocket body sloshing based on binocular vision measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(1): 81–86. DOI: 10.5768/JAO202243.0103002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改进Fast-RCNN的双目视觉车辆检测方法

Binocular vision vehicle detection method based on improved Fast-RCNN

应用光学. 2018, 39(6): 832–838 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0602001>

基于双目视觉的大型高反光构件测量系统

Measurement system of large-scale high reflective component based on binocular vision

应用光学. 2021, 42(4): 577–585 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401002>

基于双目视觉的车身焊点定位误差补偿研究

Research on compensation for positioning errors of carbody welding points based on binocular vision

应用光学. 2021, 42(1): 79–85 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0102005>

硬管式无人机AAR双目视觉导航算法研究

Binocular vision navigation algorithm for AAR of flying boom UAV

应用光学. 2017, 38(6): 910–916 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0602002>

基于双目立体视觉的高压绝缘子在线检测系统

On-line measurement system of high voltage insulator based on binocular stereo vision

应用光学. 2018, 39(4): 528–535 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0403003>

基于单目视觉的航天器位姿测量

Position and pose measurement of spacecraft based on monocular vision

应用光学. 2017, 38(2): 250–255 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0203001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 01-0081-06

一种基于双目视觉的箭体晃动在线监测方法

薛春岭, 张 峰, 刘炼雄

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为监测液体运载火箭箭体长期储存状态下的晃动情况, 保证产品的安全稳定, 提出一种基于双目视觉测量的箭体晃动在线监测方法。利用全站仪等设备对像机内、外参数进行高精度标定; 测量在箭体坐标系下同一标识点不同时刻的精确坐标; 通过不同时刻标识点的坐标变化及约束条件构建方程组并求解位姿变换参数, 进而得到实时箭体晃动量。实验验证结果表明: 单个标识点最大测量误差、总偏差分别为 0.026 mm 和 0.079 mm, 能够有效满足箭体晃动在线监测的实际需求。

关键词: 运载火箭; 晃动; 位姿; 双目视觉; 在线监测

中图分类号: TN206; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0103002

On-line monitoring method of rocket body sloshing based on binocular vision measurement

XUE Chunling, ZHANG Feng, LIU Lianxiong

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: For monitoring the sloshing of the rocket body for liquid launch vehicle on long-term duty, and ensuring the safety and stability of the product, an on-line monitoring method of rocket body sloshing based on binocular vision measurement was proposed. Firstly, the internal and external parameters of the camera were calibrated with high precision by total station and other devices. Secondly, the precise coordinates of the same marked point at different time were measured. Finally, a set of equations were constructed to solve the parameters of pose transformation through the coordinate changes of the marked points at different times and the constraint conditions, and then the amount of rocket body sloshing was obtained. The results show that the maximum measurement error and total deviation of single marked point are 0.026 mm and 0.079 mm respectively, which can effectively meet the actual needs of on-line monitoring of rocket body sloshing.

Key words: launch vehicle; sloshing; position and pose; binocular vision; on-line monitoring

引言

对长时间处于发射台上的液体运载火箭、支撑箭体的支架、发射台钢丝轴承、液压系统等出现塑性变形或故障, 可能会引起火箭箭体晃动或倾斜^[1]。当晃动或倾斜幅度超出一定范围会使箭体元件受损, 不断地累积就会造成箭体倾斜或倒塌等严重后果。因此, 必须实时监测火箭箭体的晃动量。通常的方法是, 在设备内部安装陀螺仪传

感器、3 轴加速度传感器或压力传感器进行结构件晃动监测, 并以晃动量监测值来消除误差影响^[2]。

设备晃动可能给一些核心元件带来潜在危险, 例如当航天设备中的燃料存储箱发生晃动时, 会导致燃料泄漏, 甚至会因燃料泄漏而发生爆炸。对此, 张小虎和 LIU 等人以火箭的靶场实验测量为背景, 利用摄影测量技术的非接触特点, 通过获得人工标识点坐标及实时位姿变换参数的方法,

收稿日期: 2021-07-13; 修回日期: 2021-10-09

基金项目: 国家自然科学基金 (61833016); 陕西省自然科学基金 (2018JQ1046)

作者简介: 薛春岭 (1979—), 男, 博士生, 工程师, 主要从事视觉测量和元器件可靠性分析研究。E-mail: chling_xue@163.com

对火箭整体实时晃动进行在线监测,同时利用获取的晃动数值减小测量误差^[3-4]。这些研究方式尽管能够实现对箭体晃动实时监测,但由于所采用的技术手段仍存在特征点提取、坐标值求解精度不高及姿态参数解算效率较低等不足,一定程度上影响了晃动测量的精度。

在实际的位姿参数求解过程中,求取位姿变换参数需通过多个点的约束进行有效求解。正如文献[5]中指出,求解体目标的三维位置姿态参数的问题可转化为利用多个标识点求参数的PNP问题,因而为了求有效解,需对PNP问题分析讨论。依据有关求解PNP问题及双目交会测量的相关研究^[6-12],在求解位姿变换参数的问题上,为获取线性唯一解可由P6P问题简化为P3P问题,利用3个以上标识点即可完成对相关参数的直接线性求解。基于此,该文采用双目视觉测量方法构建一种任意2个标识点间空间距离相等的约束关系,对所建立的标识点坐标系位姿变换参数进行了高精度求解,结合箭体坐标系与标识点坐标系间的几何约束,依据空间物体位姿变换参数获取了结构件晃动的在线监测数据。

1 火箭箭体晃动在线监测方法

为保证箭体晃动测量结果的可靠性和准确性,本文利用2台单目像机组成双目视觉测量系统和3个编码标识点实现对标识点坐标的在线测量,并依据标识点的坐标变化求解相应位姿变换的参数,进而间接表征结构件发生的晃动特征量。图1为晃动测量示意图。

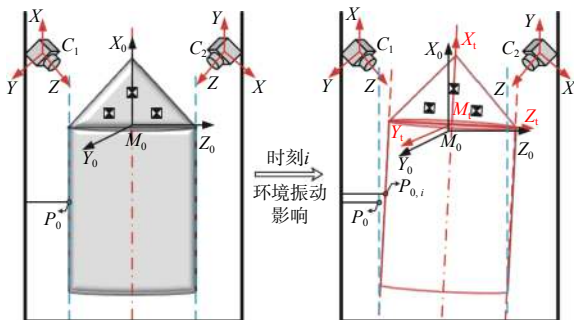


图1 晃动测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shloshing measurement

1.1 标识点空间坐标的实时测量

结合图1,建立如图2所示的双目视觉测量原理示意图,所需的像机坐标系为CXYZ(包括

C_1XYZ 和 C_2XYZ),世界坐标系为WXYZ和箭体坐标系为MXYZ。基于以上模型,对箭体结构的晃动量监测即可转换为初始箭体坐标系 M_0XYZ 与实时箭体坐标系 M_tXYZ 间的位姿参数求解。

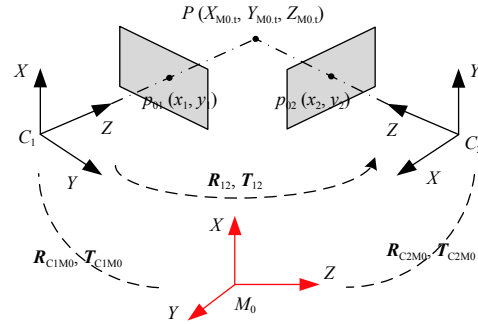


图2 双目视觉测量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of binocular vision measurement

用 X_m 、 X_n 表示空间某点在 m 、 n 坐标系下对应的坐标向量,则2个坐标系之间转换关系为

$$X_n = R_{mn}X_m + T_{mn} \quad (1)$$

式中: R_{mn} 、 T_{mn} 分别表示旋转矩阵和平移向量。

结合图2,可得如下转换关系。

像机坐标系CXYZ与世界坐标系WXYZ转换关系为

$$X_W = R_{CW}X_C + T_{CW} \quad (2)$$

世界坐标系WXYZ与箭体坐标系MXYZ转换关系为

$$X_M = R_{WM}X_W + T_{WM} \quad (3)$$

像机坐标系CXYZ与箭体坐标系MXYZ转换关系为

$$X_M = R_{CM}X_C + T_{CM} \quad (4)$$

同时,通过(2)式和(3)式可得像机坐标系CXYZ和箭体坐标系MXYZ转换关系为

$$X_M = R_{WM}R_{CW}X_C + R_{WM}T_{CW} + T_{WM} \quad (5)$$

由于(4)式和(5)式是等价的,比较得到

$$R_{CM} = R_{WM}R_{CW} \quad (6)$$

$$T_{CM} = R_{WM}T_{CW} + T_{WM} \quad (7)$$

由于双目像机固定,因而像机坐标系与世界坐标系相对位置不变,即 R_{CW} 和 T_{CW} 不随时间改变;但箭体坐标系与世界坐标系将随着箭体晃动发生相对改变,即 R_{WM} 和 T_{WM} 与时间有关。故像机、初始箭体坐标系间的位姿变换参数 R_{CM0} 、 T_{CM0} 可表示为

$$\begin{cases} R_{CM0} = R_{WM0}R_{CW} \\ T_{CM0} = R_{WM0}T_{CW} + T_{WM0} \end{cases} \quad (8)$$

当标识点P的世界坐标(X_W, Y_W, Z_W)随着箭体晃动发生变化时,其在初始箭体坐标系下的坐标

$(X_{M0,t}, Y_{M0,t}, Z_{M0,t})$ 也必将发生变化。双目视觉测量系统能够同时获取2组关于标识点坐标的方程,克服了单目像机无法求解3个未知数的缺点,因而可有效完成对初始箭体坐标的实时测量。当获取了标识点 P 在2台测量像机中对应像点 $p_{01}(x_1, y_1)$ 和 $p_{02}(x_2, y_2)$ 时,依据共线方程可得到如下关系式:

$$\begin{cases} Z_{c1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = K_1 [R_{C1M0} | T_{C1M0}] \begin{bmatrix} X_{M0,t} \\ Y_{M0,t} \\ Z_{M0,t} \\ 1 \end{bmatrix} \\ Z_{c2} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = K_2 [R_{C2M0} | T_{C2M0}] \begin{bmatrix} X_{M0,t} \\ Y_{M0,t} \\ Z_{M0,t} \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

(9)式中包含4个方程和3个未知数 $(X_{M0,t}, Y_{M0,t}, Z_{M0,t})$,故根据事先标定好的像机参数 K_1 、 K_2 、 R_{C1M0} 、 T_{C1M0} 、 R_{C2M0} 和 T_{C2M0} 即可对标识点的空间坐标 $(X_{M0,t}, Y_{M0,t}, Z_{M0,t})$ 进行实时测量。由于上述线性求解结果易受噪声和初始误差的影响,因此在获取标识点坐标的初始值后,需对其进行误差修正。采用文献[13]的约束条件,以修正后标识点坐标与实际标识点坐标的距离平方和最小为目标函数,优化求解出精度可靠的坐标值。

1.2 箭体坐标系位姿变换参数实时测量

为有效求解初始箭体坐标系 M_0XYZ 与实时箭体坐标系 M_tXYZ 间的位姿变换参数 $R_{M0,t}$ 、 $T_{M0,t}$,可将其直接转换为求解不同时刻下标识点坐标在初始箭体坐标下发生的位姿变换:

$$\begin{bmatrix} X_{M0,t} \\ Y_{M0,t} \\ Z_{M0,t} \end{bmatrix} = R_{M0,t} \begin{bmatrix} X_{M0} \\ Y_{M0} \\ Z_{M0} \end{bmatrix} + T_{M0,t} = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \\ r_3 & r_4 & r_5 \\ r_6 & r_7 & r_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{M0} \\ Y_{M0} \\ Z_{M0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

在实时获取坐标值 $(X_{M0,t}, Y_{M0,t}, Z_{M0,t})$ 、 (X_{M0}, Y_{M0}, Z_{M0}) 后,可依据(10)式求解不同时刻箭体坐标系的位姿变换参数 $R_{M0,t}$ 、 $T_{M0,t}$,进而求得箭体晃动量。

由于直接求解的参数结果容易受到扰动因素的干扰,因此在求解过程中对标识点设置了任意2个标识点间空间距离相等的约束条件。在获得线性求解的参数初值后,按照约束条件对位姿变换参数进行非线性优化,以保证参数精度的可靠性和稳定性。其目标优化函数为

$$S = \sum_{j>i}^3 \sum_{i=1}^2 (|P_i P_j| - |\hat{P}_{i,t} \hat{P}_{j,t}|)^2 \quad (11)$$

式中: P_i 、 P_j 为像机实时测量得到的标识点坐标; $\hat{P}_{i,t}$ 、 $\hat{P}_{j,t}$ 为利用初值坐标和求解出的位姿变换参数

进行求解的标识点坐标。

2 位姿变换参数求解流程

在求解了标识点初始箭体坐标系中的实时坐标后,可由其坐标变化求出相应的位姿变换参数,具体求解流程如下。

Step 1: 建立箭体坐标系、世界坐标系和2个单目像机坐标系,并对双目像机内外参数进行初始标定;

Step 2: 利用全站仪等设备对编码标识点进行位姿测量,记为初始坐标 (X_{M0}, Y_{M0}, Z_{M0}) ;

Step 3: 利用双目像机获取标识点的实时图像,结合相应畸变校正法^[14]对图像畸变进行在线校正,并运用(9)式对标识点进行实时测量,记为实时坐标 $(X_{M0,t}, Y_{M0,t}, Z_{M0,t})$;

Step 4: 根据步骤2、3获得的标识点初始坐标值和实时坐标值,求位姿变换参数初始值。

Step 5: 利用非线性优化方法求位姿变换参数 $R_{M0,t}$ 、 $T_{M0,t}$,据此求解箭体晃动值,完成对箭体晃动量的在线监测。

3 实验验证

由于位姿变化是影响贮存状态箭体晃动的主要因素,而本文在简化其他影响因素的基础上,对箭体晃动的测试实验利用3轴旋转台验证了位姿变换的影响。实验设备主要包括3轴旋转台、微视MVC14KSAC-GE6像机、C3516-M镜头、自研箭体模拟件和测量仪,相关设备和模拟件如图3所示。



图3 测量实验中相关设备和模拟件

Fig. 3 Relevant equipment and simulators in measurement experiment

在OpenCV2.4.9环境下,像机采样频率远高于箭体晃动频率,并对双目像机坐标系与世界坐标

系位置进行标定。相关实验数据的对比分析结果和参数标定如图4所示。



图4 双目相机标定实验

Fig. 4 Calibration experiment of binocular camera

3.1 坐标测量精度验证实验

在坐标测量精度验证实验中,分别将3个标识点等间距粘贴于标识点坐标系(与箭体坐标系重合)的3个坐标轴上。首先,在离线情况下完成对2台相机的高精度标定,并获取其内外参数,具体标定实验见图4所示;然后,利用双目交会原理从不同位置对标识点坐标进行测量,并将其与标准坐标值(由全站仪等辅助设备测量得到的高精度坐标)进行多组对比实验。在标准坐标下,标识点1坐标为(100.00, 0.00, 0.00)、点2坐标为(0.00, 100.00, 0.00)、点3坐标为(0.00, 0.00, 100.00),单位为mm,如图5所示。

为方便实验分析处理,在获取了标识点空间坐标后,将其空间坐标转换至标识点坐标系中,其中每组实验所获取的标识点坐标如表1所示,进行数据处理后的测量偏差如图6所示。由图6可知,在10次不同测量实验中,单个标识点测量误差最

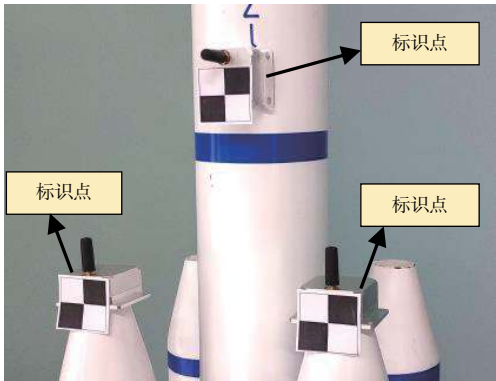


图5 标识点位置

Fig. 5 Location of marked points

大值不超0.026 mm、坐标总偏差不得超过0.079 mm,偏差平均值为0.063 mm。从实验结果可以看出,文中利用的双目视觉测量方法求解的标识点坐标精度较高,能够满足实际测量和后续位姿参数解算的精度要求。

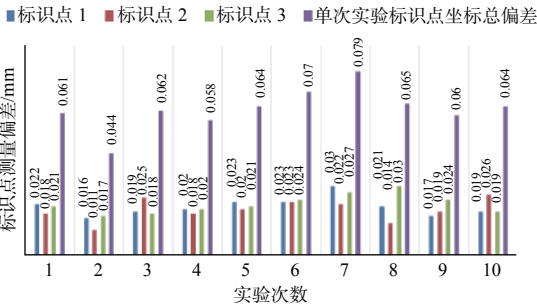


图6 标识点坐标测量误差

Fig. 6 Coordinates measurement error of marked points

表1 标识点坐标测量结果

Table 1 Coordinates measurement results of marked points

单位为mm

编号	标识点1			标识点2			标识点3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	100.018	0.012	0.003	-0.015	99.991	0.004	0.016	0.014	100.000
2	100.007	-0.014	0.002	0.004	100.010	0.000	0.007	-0.012	99.991
3	99.992	0.005	-0.017	-0.013	99.995	-0.021	0.000	0.003	99.982
4	100.004	-0.016	0.011	0.002	99.982	0.003	-0.014	-0.011	100.009
5	100.017	-0.016	0.001	0.017	100.002	-0.011	0.011	-0.017	100.003
6	100.019	0.007	-0.010	0.023	100.000	0.002	-0.024	0.000	100.001
7	99.980	-0.022	0.004	0.007	99.985	-0.014	0.010	-0.020	100.015
8	99.994	-0.015	-0.013	-0.012	99.994	0.002	-0.013	0.006	99.974
9	100.003	0.009	-0.014	-0.010	100.011	0.012	0.009	-0.016	99.984
10	100.001	0.005	0.018	0.024	100.008	0.004	0.019	0.001	100.000

注:表中各标识点坐标值为转换至标识点坐标系后所得结果。

3.2 位姿变换精度验证实验

为进一步验证所提方法求解位姿变换参数的

精度,在前面得到标识点坐标的基础上,利用3轴旋转台,设计了分步位姿变换的实验方案。首先,

利用位姿测量方法对标识点坐标系、世界坐标系和旋转台坐标系之间的位姿参数进行标定;然后,通过控制旋转台的实时输出量,对标识点坐标系的实时位姿参数(3个姿态角 A_x 、 A_y 、 A_z 和3个平移量 T_x 、 T_y 、 T_z)进行转换求解,以获取实验测量的理论参考数据;同时,利用双目视觉测量系统对标识点坐标进行实时测量,并解算各时刻间的位姿变换参数;最后,通过标准参考数据(控制旋转台输出的角度 α_0 、 β_0 、 γ_0 及利用几何变换求解的平移量 T_{x0} 、 T_{y0} 、 T_{z0})与测量数据的对比来验证方法的有效性。

图7为实验所测量的旋转角参数和平移参数,蓝线为测量值,红线为真实值,滚动角、俯仰角和偏航角依次按照线性增至 10° ,加载区间分别为 $0\sim 50\text{ s}$ 、 $50\text{ s}\sim 100\text{ s}$ 和 $100\text{ s}\sim 150\text{ s}$ 。数据分析结果如表2所示。由表2可以看出,利用本文方法所得标识点坐标系的实时位姿参数(3个姿态角和3个平移量),Y轴俯仰角误差较大,最大误差为 1.27° ;Z轴平移量误差较大,最大误差为 8.14 mm 。

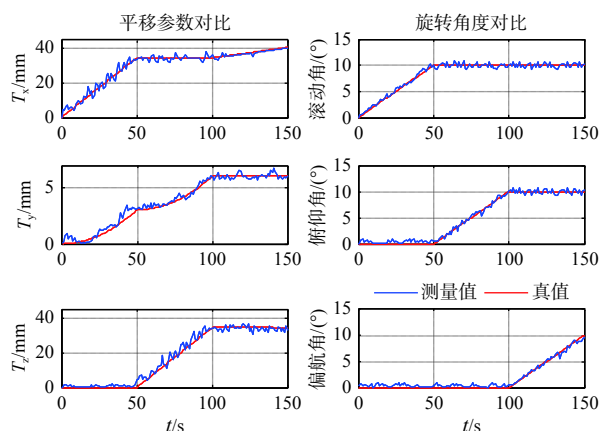


图7 位姿变换参数测量精度实验

Fig. 7 Measurement accuracy experiment of pose transformation parameters

表2 位姿参数解算误差分析

Table 2 Error analysis of pose parameter calculation

参数	T_x/mm	T_y/mm	T_z/mm	$A_x/(\circ)$	$A_y/(\circ)$	$A_z/(\circ)$
最小误差	0.28	0.23	0.53	0.12	0.19	0.20
最大误差	7.21	2.19	8.14	1.08	1.27	1.01
平均误差	5.54	1.57	6.93	0.51	0.54	0.37

由表2可知,测量结果的平移量平均误差不超过 6.93 mm 、旋转角度平均误差不超过 0.54° ,与文献[15]~[16]中方法的求解精度相当,有效证明了本文方法求解位姿变换参数的有效性和可靠性。

4 结论

针对火箭整体结构早期晃动量的在线监测,提出了一种基于双目像机实时位姿参数测量的方法。在求解高精度实时坐标中,引入了任意2个标识点间空间距离相等的约束条件,进一步优化求解了箭体坐标系下的实时坐标值,保证了参数精度的可靠性和稳定性。根据不同时刻间箭体坐标系的位姿变换参数,实现了对箭体结构件晃动量的在线监测。从实验验证结果看,标识点实时坐标的求解精度满足了火箭箭体结构件晃动量的监测需求。

参考文献:

- [1] 孙杭, 郑宇, 李少阳. 运载火箭晃动分析中知识模型的构建及应用[J]. 宇航学报, 2019, 40(3): 277-285.
SUN Hang, ZHENG Yu, LI Shaoyang. Construction and applications of knowledge model in sloshing analysis for launch vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(3): 277-285.
- [2] 白翔, 王颖, 高昕, 等. 车载经纬仪晃动测量与修正方法研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(增刊): 161-165.
BAI Xiang, WANG Ying, GAO Xin, et al. Research on measuring and modifying for mobile theodolite's sloshing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(增刊): 161-165.
- [3] 张小虎, 刘进博, 刘铁军, 等. 不稳定平台晃动测量与修正方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(5): 471-475.
ZHANG Xiaohu, LIU Jinbo, LIU Tiejun, et al. Measuring and correcting method for shaking platform of vehicle-mounted theodolite[J]. Sci. Sin. Tech., 2015, 45(5): 471-475.
- [4] LIU Jinbo, ZHANG Xiaohu, LIU Haibo, et al. New method for camera pose estimation based on line correspondence[J]. Sci. China Tech. Sci., 2013, 56(11): 2787-2797.
- [5] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
YU Qifeng, SHANG Yang. Videometrics: principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [6] 王婧, 李双江, 田石柱. 双目立体视觉技术在结构试验中的应用[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 821-826.
WANG Jing, LI Shuangjiang, TIAN Shizhu. Application of binocular stereo vision technology in structural test[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6): 821-826.

- [7] GAO Xiaoshan, HOU Xiaorong, TANG Jianliang, et al. Complete solution classification for the perspective-three-point problem[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(8): 930-943.
- [8] 马大智, 于斌超, 张彦泽, 等. 基于双目视觉的大型高反光构件测量系统[J]. *应用光学*, 2021, 42(4): 1-9.
MA Dazhi, YU Binchao, ZHANG Yanze, et al. Measurement system of large space local high reflective component based on binocular vision[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(4): 1-9.
- [9] WU Y, HU Z. PNP problem revisited[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2006, 24(1): 131-141.
- [10] 吴福朝, 胡占义. PnP问题的线性求解算法[J]. *软件学报*, 2003, 14(3): 682-688.
WU Fuchao, HU Zhanyi. A linear method for the PnP problem[J]. *Journal of Software*, 2003, 14(3): 682-688.
- [11] 束安, 裴浩东, 丁雷, 等. 空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1712003.
SHU An, PEI Haodong, DING Lei, et al. Binocular visual position and attitude measurement method for a spatial non-cooperative target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1712003.
- [12] YUAN Haiwen, XIAO Changshi, XIU Supu, et al. A new combined vision technique for micro aerial vehicle pose estimation[J]. *Robotics*, 2017, 6(2): 1-16.
- [13] 朱枫, 何雷, 郝颖明. 视觉位姿测量中单目视觉与双目立体视觉测量精度比较[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(4): 165-169.
ZHU Feng, HE Lei, HAO Yingming, et al. Contrast of calculated accuracy between monocular vision and binocular vision without modeling[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(4): 165-169.
- [14] 刘炼雄, 胡昌华, 何川, 等. 一种改进的基于直线特征的非量测畸变校正方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 191-199.
LIU Lianxiong, HU Changhua, HE Chuan, et al. An improved non-metric distortion calibration method based on straight line characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 191-199.
- [15] 阮利锋, 王赓, 盛焕烨. 基于标志点识别的三维位姿测量方法[J]. *计算机应用*, 2008, 28(11): 2856-2859.
YUAN Lifeng, WANG Geng, SHENG Huanye. 3D position and attitude measurement based on marking-points recognition[J]. *Computer Applications*, 2008, 28(11): 2856-2859.
- [16] 赵振庆, 叶东, 陈刚, 等. 垂直直线特征的双目视觉位姿测量方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 193-199.
ZHAO Zhenqing, YE Dong, CHEN Gang, et al. Binocular vision method of measuring pose based on perpendicular lines[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 193-199.