

双目测量系统目标相对位置误差分析

张 刘¹, 支 帅^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 目标特征点三维坐标的测量精度直接影响目标位姿的解算, 准确确定影响目标位姿的误差因素, 对各项误差进行合理分配及综合, 是提高目标测量精度的关键。目前, 像点提取精度、特征点匹配精度根据现有算法已达到瓶颈, 而在摄像机内部结构及标定等方面提高测量精度还有较大的研究空间。通过建立成像点坐标测量方程, 综合分析各误差因素对目标位置的影响。通过实验分析与仿真, 摄像机内部结构误差及标定误差对成像点坐标的影响在一个像素内, 当 $f=0.0319\text{ m}$, 目标距离为 20 m 时, 目标位置总体测量精度为 0.0294 m 。对光学成像系统内部结构的设计及电子器件的选型具有较大参考价值。

关键词: 双目测量系统; 测量精度; 成像点坐标; 误差分析

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)S-0116-07

Error analysis on relative position of target of binocular measurement system

Zhang Liu¹, Zhi Shuai^{1,2}

(1. National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Solution of target pose is influenced by measurement error of 3D coordinate of target feature points directly, to determine error factors that influence target pose accurately, distribution and comprehensive on the errors reasonably is the key to improve measurement precision. At present, the accuracy of point extraction and feature points matching has reached a bottleneck according to the existing algorithm, but the internal structure and calibration of the camera which can reduce the measuring error has huge research space. In this paper, through establishing the coordinate measuring equation of image point, the impact of various error factors on location of the target was analyzed synthetically. Through the experimental analysis and simulation, the errors of internal structure and calibration which impact on the coordinate of imaging point is within a pixel, when $f=0.0319\text{ m}$, and the distance of target is 20 m , measurement accuracy of the target is 0.0294 m . It has great reference value on the design of the internal structure of optical imaging system and the selection of electronic devices.

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 国家军口 863 项目(2014AA7044030)

作者简介: 张刘(1978-), 男, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事非线性控制、TDI CCD 建模与仿真、卫星姿态控制等方面的研究。

Email: zhangliu78@163.com

Key words: binocular measurement system; measuring precision; coordinates of image point; error analysis

0 引言

随着人类探索、开发和利用外层空间的深入及太空战的需求,对视觉交会对接技术的精度提出了更高要求,诸如故障航天器在轨捕获与维修、空间垃圾清除等课题已成为航天技术发展需面对和亟待解决的课题。双目视觉测量是一种高度智能化的测量技术,因其具有直观、精度高、抗电磁干扰能力强、自主性好等特点,在空间对接、捕获与维修等在轨操作任务中发挥着越来越重要的作用。

双目视觉测量是根据同一空间目标特征点在两摄像机中的成像位置不同(即视差)来对目标进行三维重构,根据目标上特征点的三维坐标获得目标在卫星坐标系下相对姿态的一种技术,可以在空间目标几何尺寸未知的环境下获得其在参考坐标系下的位姿。随着现代空间技术的飞速发展,对空间视觉相对测量精度要求越来越高,因此,如何利用双目视觉在空间测量环境复杂、目前软硬件条件限制的条件下,系统获得高精度的测量结果已成为各国研究的重点。

参考文献[1]理论分析了摄像机标定、特征提取及结构参数对系统测量精度的影响;参考文献[2]讨论了深度测量误差与摄像机参数、基线长度及测量深度间的关系;参考文献[3]主要对图像识别及结构参数误差进行了讨论;参考文献[4]和[5]分别对模型误差及量化误差进行了详细分析,但以上文献均未对光学成像系统的镜头畸变、内部结构及实际标定误差进行分析。

文中对光学成像系统的镜头畸变、内部结构误差及双目测量系统标定误差进行分析,建立影响光学成像系统成像点坐标的测量方程,确定目标位置坐标的测量精度。在现有机械加工水平的前提下,如何更合理地对双目测量系统的各项误差进行分配进而提高目标位置测量精度是文中的重点。

1 双目测量系统误差测量方程的建立

1.1 双目测量系统坐标系定义

为充分分析视觉测量系统测量误差的影响因

素,首先要对系统的坐标系给予定义,如图 1 所示。

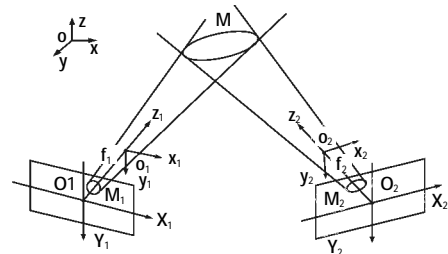


图 1 双目测量系统坐标系定义

Fig.1 Definition of binocular measurement coordinate system

图像坐标系:左摄像机图像坐标系为 $O_1-X_1Y_1$,右摄像机图像坐标系为 $O_2-X_2Y_2$; O_1 、 O_2 分别为左、右摄像机光轴与图像平面中心的交点。左摄像机图像像素坐标系记为 $O_r-u_rv_r$, u_r 、 v_r 轴分别与 X_1 、 Y_1 平行;右摄像机图像像素坐标系记为 $O_l-u_lv_l$, u_l 、 v_l 轴分别与 X_2 、 Y_2 平行, O_l 在像素坐标系中的坐标为 (u_{l0}, v_{l0}) , 如图 2 所示。

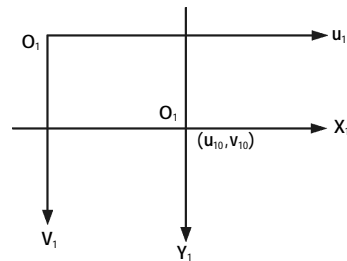


图 2 左图像坐标系

Fig.2 Left image coordinate

摄像机坐标系:以左摄像机光心 o_1 为原点,光轴为轴,建立左摄像机坐标系为 $o_1-x_1y_1z_1$,同理,建立右摄像机坐标系为 $o_2-x_2y_2z_2$ 。光轴与图像平面垂直, x_1 、 y_1 分别与图像坐标系的 X_1 、 Y_1 轴平行, x_2 、 y_2 分别与图像坐标系的 X_2 、 Y_2 轴平行。

世界坐标系 $o-xyz$: 目标所在坐标系,用于描述摄像机与目标物体的位置关系。

立方镜坐标系:在双目测量系统中,通过立方镜坐标系确定摄像机坐标系。设左立方镜坐标系为 $O_l-X_lY_lZ_l$,如图 3 所示,左立方镜坐标系 Y_l 、 Z_l 轴分别与左摄像机坐标系 y_1 、 z_1 轴平行,同理,建立右立方镜坐标系为 $O_k-X_kY_kZ_k$ 。

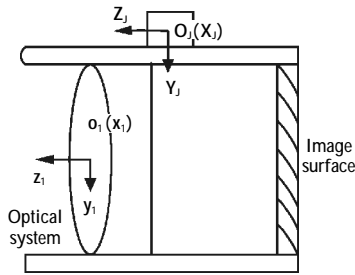


图 3 立方镜坐标系定义示意图

Fig.3 Schematic diagram of cubic prism coordinate system

1.2 双目测量系统三维重建模型

双目测量技术通过视差原理来确定目标位置。实际双目视觉测量系统中,两摄像机水平放置。空间目标 $M(x, y, z)$ 在左右两摄像机下的图像坐标分别为 $M_1(X_1, Y_1)$ 、 $M_2(X_2, Y_2)$, 左右两摄像机焦距分别为 f_1 、 f_2 , 右摄像机坐标系相对于左摄像机坐标系间的转换关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + T \quad (1)$$

式中: R 和 T 为左右摄像机间的旋转矩阵和平移矩阵,可分别记为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

则根据透视投影变换及坐标系转换得目标特征点 M 的三维坐标为:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{z_1 x_1}{f_1} \\ y_1 = \frac{z_1 y_1}{f_1} \\ z_1 = \frac{f_1(f_2 t_x - x_2 t_z)}{x_2(r_{31}x_1 + r_{32}y_1 + r_{33}f_1) - f_2(r_{11}x_1 + r_{12}y_1 + r_{13}f_1)} \\ = \frac{f_1(f_2 y_x - y_2 t_z)}{y_2(r_{31}x_1 + r_{32}y_1 + r_{33}f_1) - f_2(r_{11}x_1 + r_{12}y_1 + r_{13}f_1)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: (x_1, y_1, z_1) 为 M 在左摄像机坐标系下的坐标。

通过公式(3)可知,要确定空间目标位置坐标,需确定两摄像机的有效焦距,目标特征点在左右两摄像机的成像点坐标及两摄像机坐标系间的转换关系。

1.3 视觉测量系统误差分析

根据上文分析及双目测量系统误差模型,如图 4 所示,确定影响系统精度的误差因素包括:

- (1) 摄像机内参数标定误差;
- (2) 立方镜坐标系与摄像机坐标系及左、右两摄像机间坐标系标定误差;
- (3) 两摄像机基线距、光轴与基线夹角误差。

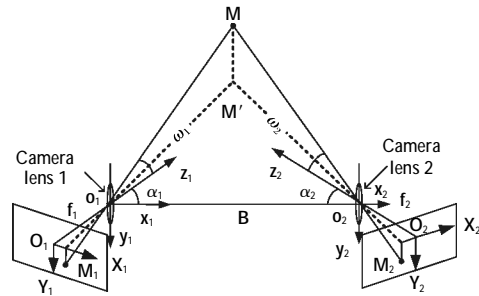


图 4 双目测量系统结构参数分析模型

Fig.4 Structural parameters analysis model of binocular measurement system

1.3.1 摄像机内参数标定误差分析

摄像机内参数标定及空间目标特征点的三维坐标计算,需根据目标特征点在成像面上的坐标通过计算获得,因此,分析成像面的成像点坐标的误差影响因素是关键。影响摄像机内参数标定误差因素主要包括:光学系统镜头畸变、相机内部安装结构、量化误差及电子器件噪声等。

光学系统镜头畸变引起主光线像差,使成像点偏移,如图 5 所示^[6]。镜头畸变造成像面主点及成像点偏离理想位置,影响摄像机内参数标定及目标特征点三维坐标的计算。

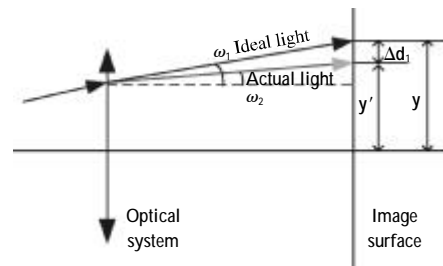


图 5 畸变对成像点坐标影响示意图

Fig.5 Schematic diagram of imaging point coordinate influenced by distortion

Δd_1 为线畸变,是理想像高与实际像高偏差。采用精密测角法测量 Δd_1 为:

$$\begin{aligned} y' &= f \cdot \tan \omega \\ \Delta d_1 &= y - y' \end{aligned}$$

式中: y 为理想像高, y' 为实际像高, f 为摄像机有效

焦距; ω 为实际视场角; $\Delta d_1/y$ 为相对畸变。

实际工程中,探测器芯片选用的型号为CMV4000,其像素阵列为2048×2048,像素大小为5.5 μm×5.5 μm,光学系统设计畸变为千分之二,则受畸变影响的成像点的偏差约为0.6个像素,如图6所示。

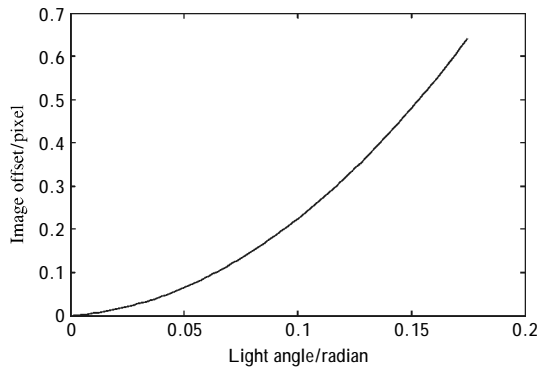


图6 畸变对成像点坐标影响

Fig.6 Imaging point coordinate influence by distortion

相机的内部结构如图7所示。A为焦面电箱的安装基准,B为CMOS固定结构的安装基准,C为双目对接镜头的安装基准,D为基准棱镜的安装基准。通过调整螺孔间隙窜动CMOS固定结构使得CMOS像元的基线分别平行于箱体上基准面D、E;A、B、C基准两两平行;A、D、E基准两两垂直。实际摄像机内部结构因机械加工及装调等原因的存在,安装基准不会完全平行或者垂直,会有一些的角度误差。文中摄像机内部结构设计中,CMOS像元的基线与箱体上基准面D、E的平行度优于20",CMOS像面与箱体上基准面B的平行度优于20",基准面A、B、C之间的平行度优于20",基准面A、D、E之间的平行度优于20"。

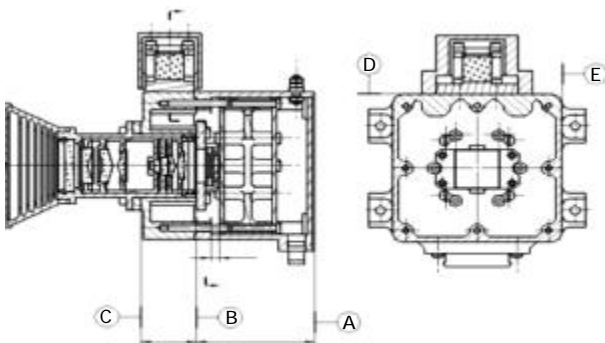


图7 相机内部结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of internal structure of camera

通过相机内部结构示意图,理想成像面应与光学系统主光轴垂直,但由于机械加工、装调等因素,导致成像点坐标发生偏离,其主要误差因素包括:光轴与CMOS成像面不垂直、CMOS实际成像面与理想成像面不重合,如图8所示。

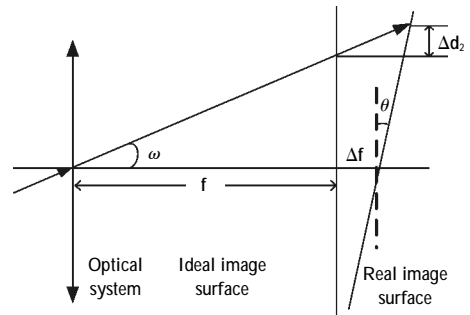


图8 CMOS安装误差对成像点坐标影响

Fig.8 Effects of CMOS mounting error on imaging point coordinates

θ 为实际成像面偏离理想成像面的角度, Δf 为实际成像面偏离理想成像面的距离,则成像面安装误差对成像点坐标的影响可由下式表示:

$$\Delta d_2 = \frac{\cos \omega_1 + \cos \theta (\Delta f + f \cdot \tan \omega_1 \cdot \tan \theta)}{\cos(\omega_1 + \theta)}$$

CMOS安装误差对成像点坐标的影响如图9所示。

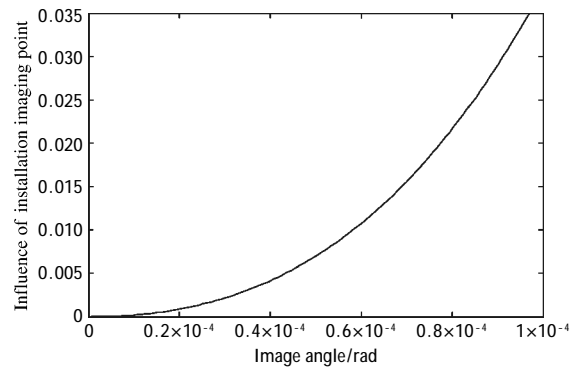


图9 CMOS安装误差对成像点坐标影响

Fig.9 Effects on imaging point coordinates of CMOS mounting error

量化误差主要是图像采集卡将模拟信号转化为数字信号过程中引入的误差,与摄像机分辨率及信号的A/D转换频率有关。CMOS的分辨率越高,量化误差越小。根据实际采用的CMOS型号,量化误差最大在±1/2个像素。

电子器件噪声及环境噪声会对成像系统获得图

像的像质造成影响,在图像处理中采用适当的图像处理办法即可减小噪声对图像的影响。

摄像机内方位元素采用测角法进行标定。高精度二维转台实现角度测试、并结合像元细分技术进行内方位元素(f、u₀、v₀)及畸变参数的标定。利用加装星点孔分化板的平行光管,构成具有空间角度的平行光束,通过转动被测摄像机对星点成像,对像点坐标测量,并利用转台读取角度数据,根据摄像机数学模型,采用多元回归的办法回归出各内参数。

根据上述摄像机内参数标定办法,标定误差主要包括:二维转台测角及调平误差均为 1";平行光管调平及自准直误差均为 1";摄像机安装误差为 1";经纬仪调平及自准直误差均为 1";

则标定相机内参数的入射光线角度误差为:

$$\delta_n = 2.646''$$

则标定对像面成像点位置的测量误差为:

$$D = |f \cdot \tan(\omega \mp \delta_n) - f \cdot \tan \omega|$$

所选标定办法及设备可保证标定影响成像点位置的最大偏差可控制在 0.073 个像素,如图 10 所示。

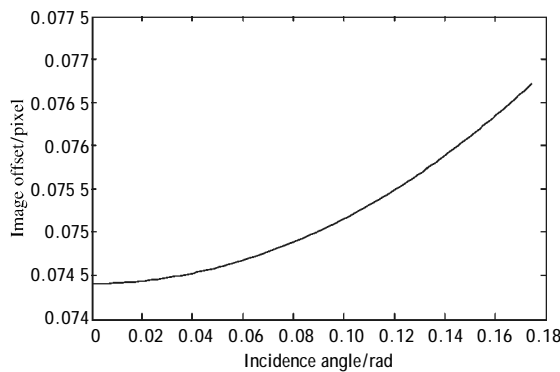


图 10 标定设备误差对成像点坐标影响

Fig.10 Effects of calibration equipment error on imaging point coordinates

星点在成像面上所成的像是一个光斑,为准确确定星点的成像位置,对成像点光斑进行提取,根据已有提取算法^[7]和文中所用摄像机的像元尺寸,像点提取精度可达到亚像元精度。通过 MATLAB 对以上各项误差进行分析计算^[8],可知摄像机内参数标定误差对成像点坐标的影响在 1 个像素内,如图 11 所示。

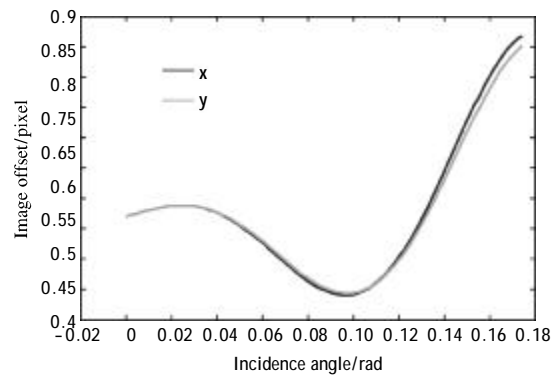


图 11 摄像机标定误差

Fig.11 Errors of camera calibration

1.3.2 坐标系间旋转角度误差

利用立方镜坐标系确定摄像机坐标系,进而确定右摄像机坐标系相对于左摄像机坐标系的转换矩阵。利用四台经纬仪组成两摄像机坐标系的测量系统,利用经纬仪自准直及互瞄建立两摄像机坐标系间的转换关系,装置示意图如图 12 所示。

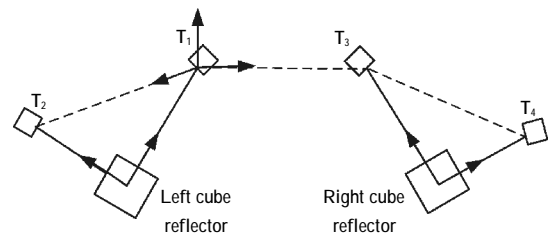


图 12 双目测量系统摄像机坐标系标定

Fig.12 Calibration of camera coordinate system to the binocular measurement system

用经纬仪 T₁ 和 T₂ 对左立方镜的两个平面进行准直,确定左立方镜坐标系两坐标轴,根据右手法则确定第三轴,得左立方镜坐标系 O_J-X_JY_JZ_J。同理,用 T₃ 和 T₄ 确定右立方镜坐标系 O_K-X_KY_KZ_K。四台经纬仪之间依次互瞄可以得到各经纬仪的坐标系间的转换关系,通过方位传递得到右立方镜坐标系相对于左立方镜坐标系的转换关系。

由于机械加工误差及安装误差的存在,摄像机坐标系与立方镜坐标系不能完全重合,需利用平行光管、经纬仪及高精度二维转台来测量立方镜坐标系与摄像机坐标系间的角度误差。将平行光管水平放置,二维转台水平轴水平并与平行光管光轴垂直放置,竖直轴垂直,二维转台与平行光管构成的坐标系与摄像机坐标系一致。

以左摄像机为例,用经纬仪自准直左立方镜 Y 轴,测得 Y_j 轴在 x_jo_jy_j 面投影与 y_j 轴的夹角 γ₁;对二维转台进行上下转动,使平行光管与左立方镜 Z_j 轴高低方向进行自准,测得 Z_j 轴在 x_jo_jz_j 面投影与 z_j 轴的夹角 α₁;对二维转台进行方位旋转,使平行光管与左立方镜 Z_j 轴方位自准,测得 Z_j 轴在 y_jo_jz_j 面投影与 z_j 轴的夹角 β₁。测量中的误差包括:二维转台调平及测角误差为 σ₁=σ₂=1";经纬仪调平、自准直误差 σ₃=σ₄=1";摄像机安装误差 σ₅=1";光管调平、自准直误差 σ₆=σ₇=1";立方镜加工误差 σ₈=3"。

测量 γ₁ 误差为:

$$\sigma_{\gamma_1} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2 + \sigma_8^2} = 3.606'';$$

测量 α₁ 误差为:

$$\sigma_{\alpha_1} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2 + \sigma_7^2 + \sigma_8^2} = 3.742'';$$

测量 β₁ 误差为:

$$\sigma_{\beta_1} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2 + \sigma_7^2 + \sigma_8^2} = 3.742''。$$

右摄像机坐标系旋转到左摄像机坐标系的测量过程中存在的误差因素包括:经纬仪自准直及调平误差;二维转台调平误差;立方镜坐标系与摄像机坐标系的转换误差 3.8"。则在右摄像机坐标系与左摄像机坐标系的旋转角度误差为:

$$\sigma_w = 4.176''$$

旋转角度误差造成旋转矩阵产生偏差。平移矩阵误差非常小,相对旋转角度误差可以忽略不计。

1.3.3 系统基线距、光轴与基线夹角误差

双目视觉测量系统中,结构参数直接影响目标的三维坐标的精度。如图 4 所示,基线距 B 即两摄像机光心之间的距离,两摄像机光轴与基线夹角 α₁ 和 α₂。根据参考文献[9]的分析可知,当基线距与目标到基线的垂直距离的比值在 1.3 附近时,三轴的综合测量误差最小,为较合适的结构。因此,对工作距离较大的目标进行测量时,要求视觉测量系统的基线距必须较大,但基线距的大小受到系统空间、体积、质量、成本和摄像机大小等因素制约,所以在实际工程应用中,基线距及两摄像机光轴与基线夹角根据工程指标进行确定。

文中确定基线距为 1 m,保障两摄像机光轴平行,且水平放置。双目测量系统基线距的测量误差可保证在 0.1 mm,根据上文摄像机内部结构的分析,摄像机光轴与基线夹角的误差可保证在 20",通过高

精度经纬仪对摄像机进行自准直,通过检校可保证夹角误差在 1"之内。

2 双目视觉目标三维测量误差的确定

在考虑摄像机内参数标定误差,坐标旋转误差及结构参数误差的基础上,文中利用 MATLAB 对目标相对位置误差进行分析^[9]。在摄像机有效焦距为 31.9 mm、目标距离为 20 m 时,位于图像边缘的图像点对目标相对位置的总体误差较大,x 坐标的测量误差最大为 0.001 04 m,y 坐标的测量误差最大为 0.001 63,z 坐标的测量误差最大为 0.029 35 m,总体测量误差最大为 0.029 4 m,如图 13 所示。

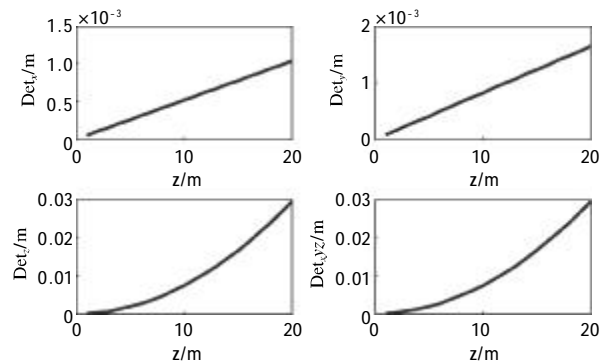


图 13 目标相对位置误差

Fig.13 Relative position errors of target

3 结论

文中根据空间目标在摄像机坐标系下的三维坐标公式,分析摄像机光学成像系统的内部结构及系统全标定对目标相对位置的影响。通过实验仿真,在镜头畸变可控的情况下,应保证实际成像面与理想成像面的夹角保证在 16"之内,可保证实际成像点坐标偏离理想成像点坐标 0.5 个像素,。当目标距离为 20 m 时,成像点坐标的偏移量对目标相对位置的最大误差在 0.029 4 m,对光学成像系统设计及电子器件的选型具有较大的参考价值。

参考文献:

- [1] Liu Fengcai, Xie Minghong, Yan Guolin. Accuracy analysis of binocular stereo vision system[J]. Computer Engineering, 2011, 37(19): 280-285. (in Chinese)
刘俸材, 谢明红, 颜国霖. 双目立体视觉系统的精度分析

- [J]. 计算机工程, 2011, 37(19): 280-285.
- [2] Liu Jiayin, Wang Zhongli, Jia Yunde. Error analysis of binocular stereo vision system[J]. Optical Technique, 2003, 29(3): 354-360. (in Chinese)
刘佳音, 王忠立, 贾云得. 一种双目立体视觉系统的误差分析方法[J]. 光学技术, 2003, 29(3): 354-360.
- [3] Min Xinli, Wang De'an, Zhang Jian. Theoretical research on CCD stereo measuring system configuration parameters [J]. Machinery Design & Manufacture, 2001 (3): 54-56. (in Chinese)
闵新力, 万德安, 张剑. CCD 双目视觉测量系统结构参数设置的理论研究[J]. 机械设计与制造, 2001, (3): 54-56.
- [4] Larry M, Steven A S. Error modeling in stereo navigation [J]. Robotics and Automation, 1987, 3(3): 239-248.
- [5] Yan Long, Zhao Zhengxu, Zhou Yiqi. Accuracy analysis and configuration design of stereo vision system based on CCD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(2): 410-413. (in Chinese)
闫龙, 赵正旭, 周以齐. 基于 CCD 的立体视觉测量系统精度分析与结构设计研究 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(2): 410-413.
- [6] Sun Ting, Xing Fei, You Zheng. Optical system error analysis of high accuracy star trackers [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0323003. (in Chinese)
孙婷, 邢飞, 尤政. 高精度星敏感器光学系统误差分析[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0323003.
- [7] Qiao Jingwei, Hu Shaoxing. Research on feature point extraction and matching in 3D reconstruction [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(S1): 400-403. (in Chinese)
乔警卫, 胡少兴. 三维重建中特征点提取与匹配算法研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(S1): 400-403.
- [8] Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] Zhang Liu, Zhi Shuai, Feng Rupeng. Error analysis of ultra-close binocular measurement systems for non-cooperative targets [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 186-192. (in Chinese)
张刘, 支帅, 冯汝鹏. 非合作目标超近距离双目测量系统误差分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 186-192.