

远距离三维坐标测量中双目视觉系统的测量精度分析

刘胜道, 邢成聪*, 周国华

海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要 针对双目视觉系统在远距离目标点三维坐标测量中的问题, 首先, 基于双目视觉测量系统的原理, 分析了双目视觉中相机标定和三维定位过程的主要误差来源; 然后, 推导了双目视觉三维定位测量系统与相机参数、特征点匹配精度、像元大小、焦距、基线长度与测量距离之间的导数关系。最后, 通过仿真实验得到各参数对测量系统定位误差的影响。实验结果表明, 该误差模型对双目视觉测量系统的设计具有一定的指导意义。

关键词 视觉光学; 双目视觉; 精度分析; 三维坐标测量; 远距离测量

中图分类号 TN386

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1415007

Measuring Precision Analysis of Binocular Vision System in Remote Three-Dimensional Coordinate Measurement

Liu Shengdao, Xing Chengcong*, Zhou Guohua

School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract Aiming at the problem of binocular vision system in three-dimensional coordinate measurement of remote target point. First, this article analyzes the main error sources of camera calibration and three-dimensional positioning process in binocular vision are analyzed based on the principle of binocular vision measurement system. Then, derivative relations between binocular vision three-dimensional positioning measurement system and camera parameters, matching accuracy of feature points, pixel size, focal length, baseline length and measurement distance are derived. Finally, the influence of each parameter on the positioning error of the measurement system is obtained through the simulation experiment. The experimental results show that the error model has a certain guiding significance for the design of binocular vision measurement system.

Key words visual optics; binocular vision; precision analysis; three-dimensional coordinate measurement; remote measurement

OCIS codes 330.1400; 150.0155; 150.1488

1 引言

为提高舰船航行的安全性, 对其进行定期消磁必不可少, 而舰船磁场检测是舰船消磁中的重要步骤。按照检测时舰船的状态可将舰船磁场检测分为静态检测和动态检测两类, 相比静态检测方法, 动态检测方法的检测效率更高且更简便, 在舰船磁场动态检测中只有将舰船航迹与磁场测量数据相融合才能得到舰船磁场的空间分布。目前, 基于全球定位系统(GPS)的舰船定位方式操作复杂、费事费力, 且

难以应用到非合作目标的定位中, 因此, 需要提出一种高效率、高精度的舰船定位方法。双目视觉测量系统搭建简便、测量精度高, 且适用于非合作目标的测量, 在目标轨迹测量方面发挥着重要的作用。

已有的双目视觉测量系统大多为近景摄影测量, 测量范围小于 100 m, 对于 1000 m 左右的远距离摄影测量研究较少, 因此, 提高双目视觉测量系统的测量精度在实际应用中具有重要意义。影响系统测量误差的因素有很多, 如相机的内外参数、特征点的匹配误差、像元大小、焦距长度、基线长度与测量距离。

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-09-12; 录用日期: 2020-09-30

通信作者: *xingchengcong@163.com

虽然双目视觉理论的研究比较成熟,但实际应用时受测量环境、系统结构、设备精度等因素的限制,视觉测量系统的构建比较困难,因此,对双目视觉系统测量精度的研究十分必要^[1]。刘倬材等^[2]分析了相机标定、特征点提取与结构参数对系统测量精度的影响;张刘等^[3]讨论了相机内参数标定误差与坐标系间旋转角度误差对目标相对位置的影响;刘佳音等^[4]分析了双目视觉系统三维(3D)测量误差与相机参数、基线长度、测量距离等因素之间的关系;李海滨等^[5]分析了视场中心测量与边缘测量 3D 坐标的精度。

上述研究均未从全方位建立相机内外参数、特征点匹配误差、像元大小、焦距长度、基线长度与测量距离等因素与双目视觉系统测量精度的关系。因此,本文基于双目测量原理建立了基于双目系统的位置误差模型,详细分析了双目视觉系统中相机内外参数、特征点匹配误差、像元大小、焦距长度、基线长度与测量距离等因素对系统测量精度的影响,并进行了数值仿真,该模型对提高远距离双目测量系统的精度具有一定指导意义。

2 双目视觉系统的测量模型

空间中的某点经小孔成像投影到双目视觉系统中的两个相机中时,两个像点与目标点组成一个三角形,基于视差原理以及相机的内外部参数,由三角形原理进行 3D 坐标的测量,就能获得空间中该点的位置信息。双目视觉系统的测量精度主要与相机的内部参数、两台相机之间的相对位置关系以及目标点与测试系统的位置关系有关,传统双目视觉系统的测量原理如图 1 所示

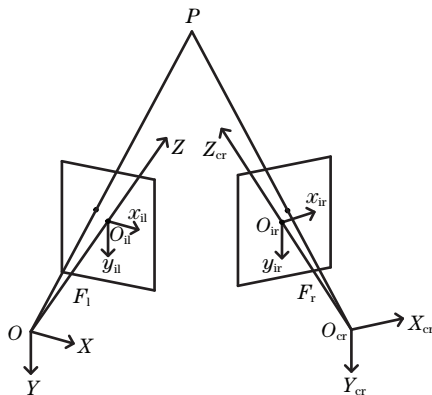


图 1 双目视觉系统的测量原理

Fig. 1 Measuring principle of the binocular vision system

图 1 中, P 点为空间目标点, $O-XYZ$ 为左相机坐标系, $O_{cr}-X_{cr}Y_{cr}Z_{cr}$ 为右相机坐标系, $O_{il}-X_{il}Y_{il}Z_{il}$ 为左相机图像物理坐标系, $O_{ir}-X_{ir}Y_{ir}Z_{ir}$ 为右相机图

像物理坐标系, F_l 和 F_r 分别为左右相机的焦距, 齐次坐标系下相机坐标系与图像物理坐标系的关系可表示为

$$Z_l \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$Z_r \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $(x_l, y_l, 1)$ 为物点 P 在左相机图像物理坐标系下的齐次坐标, $(x_r, y_r, 1)$ 为物点 P 在右相机图像物理坐标系下的齐次坐标, $(X_l, Y_l, Z_l, 1)$ 与 $(X_r, Y_r, Z_r, 1)$ 分别为物点 P 在左右相机坐标系下的齐次坐标。用 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别表示左相机坐标系 $O-XYZ$ 与 $O_{cr}-X_{cr}Y_{cr}Z_{cr}$ 之间的旋转与平移矩阵, 则

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$, $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$, t_x 、 t_y 和 t_z 分别

为左相机光心在 X 、 Y 、 Z 方向上的偏移量。由(1)式~(3)式解算的空间点坐标为

$$\begin{cases} X_l = \frac{Z_l x_l}{F_l} \\ Y_l = \frac{Z_l y_l}{F_l} \\ Z_l = \frac{F_l(F_r t_y - y_r t_z)}{y_r(r_7 x_l + r_8 y_l + F_l r_9) - F_r(r_4 x_l + r_5 y_l + F_l r_6)} \end{cases}. \quad (4)$$

由(4)式可知, 目标的位置测量仅依赖于相机内参数和双目相机之间的空间关系。根据图像中匹配点的坐标、标定得到的内参以及双目相机之间的旋转和平移矩阵就能确定目标物体在空间中的位置坐标。

3 测量误差模型与数值仿真

对双目相机进行标定后, 根据(4)式和像点坐标可计算出目标点的 3D 坐标, 即相机之间的相对位置关系对系统测量结果的影响较大。而实际操作中难以精确测量两个相机之间的位置关系, 不可避免会

存在一定的误差^[6]。假设左相机坐标系与世界坐标系重合且无误差,而右相机坐标系在位置和方向上都存在一定的偏差,则被测点在右相机坐标系上的像点坐标和实际值也存在一定偏差,导致计算出的被测点空间位置也存在误差。仿真实验的条件:左右相机参数完全一致,即分辨率为 2592 pixel×2048 pixel、焦距为 50 mm、像元大小为 4.8 μm,基线距离为 20 m,空间中目标点的坐标为(-50 m,10 m,1010 m)。由于各参数对 Z 方向的精度影响明显大于其他两个方向,因此,实验中只给出了各参数对 Z 方向的影响公式,即相对于 Z 方向的变化率。

$$s_1 p_1 = K_1 T_1 P_w, \quad (5)$$

$$s_2 p_2 = K_2 (R_2 P_w + t), \quad (6)$$

式中, s_1 为左相机坐标系下 P 点的 Z 坐标, s_2 为右相机坐标系下 P 点的 Z 坐标, p_1 、 p_2 分别为左右相机中的图像像素坐标, K_1 、 T_1 为左相机的内外参数矩阵, K_2 为右相机的内参数矩阵, R_2 为左相机坐标系到右相机坐标系的旋转矩阵, t 为左相机坐标系到右相机坐标系的偏移向量, P_w 为 P 点的世界坐标^[7]。联立(5)式和(6)式,得到

$$s_1 = \frac{-p_2^{\wedge} K_2 t}{p_2^{\wedge} K_2 R_2 K_1^{-1} T_1^{-1} p_1}, \quad (7)$$

式中, p_2^{\wedge} 为 p_2 的反对称矩阵。可以发现,目标点的 Z 坐标 s_1 与双目相机的内参数 K_1 与 K_2 、左相机外参 T_1 、左相机相对右相机的位置关系矩阵 R_2 与 t 、成像点坐标 p_1 与 p_2 有关系。

3.1 相机内参对测量精度的影响

系统内参包括主点坐标 u_0 、 v_0 ,即光轴与成像平面交点的坐标,有效焦距 f_x 、 f_y ,倾斜因子 s 。仿真时设 $s=0$, $f_x=f_y$, T_1 与 R_2 为单位矩阵, $t=[t_1 \ 0 \ 0]$,其中, t_1 为左右相机在 X 方向的平移量, $K_1=K_2=$

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, p_1 = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix}, p_2 = \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix}, v_1 = v_2, \text{由(7)}$$

式可知

$$s_1 = -t_1 f_x / (u_1 - u_2) = t_1 f_x v_2 / (v_1 u_2 - v_2 u_1). \quad (8)$$

3.1.1 焦距对测量精度的影响

考虑到相机焦距误差对双目视觉系统 3D 测量结果的影响,假设左相机焦距标定无误差,只考虑右相机焦距 f_x ,对 f_x 求导,得到

$$\frac{ds_1}{df_x} = \frac{-t_1 (u_0 - u_2)}{(u_1 - u_2)^2}. \quad (9)$$

利用 Matlab 进行数值仿真,通过添加高斯噪声模拟影响因素带来的误差。加入的高斯噪声标准差范围为 0~1,在每一噪声水平下,分别进行 50 次独立实验^[8],得到统计误差的平均值如图 2 所示。可以发现,在平行式双目立体视觉系统中,目标点位置的测量误差随焦距标定误差的增大而线性增大。焦距标定误差对 Z 方向的定位影响较大,对其他两个方向的影响较小,当焦距误差为 1 pixel 时,X、Y、Z 方向的测量误差分别为 0.020 m、0.003 m、0.300 m。

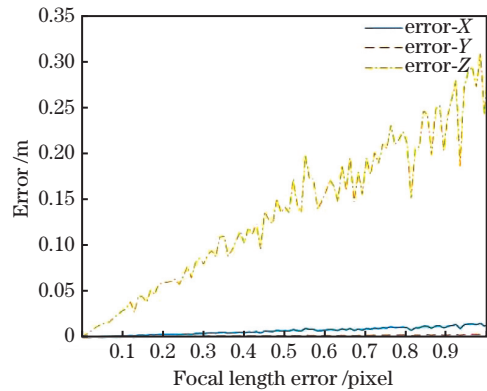


图 2 焦距标定误差对 3D 坐标测量结果的影响

Fig. 2 Influence of the focal length calibration error on 3D coordinate measurement results

3.1.2 主点对测量精度的影响

s_1 对右相机 u 轴主点坐标 u_{or} 的导数为

$$\frac{ds_1}{du_{or}} = \frac{t_1 f_x}{(u_{or} - u_0 + u_1 - u_2)^2}. \quad (10)$$

在相同仿真条件下,得到统计误差的平均值如图 3 所示。可以发现,主点的标定误差对定位的影响大于焦距对定位的影响^[9],当 u 轴主点的标定误差为 1 pixel 时,目标点在 X、Y、Z 方向的测量误差分别为 0.20 m、0.04 m、4.40 m。

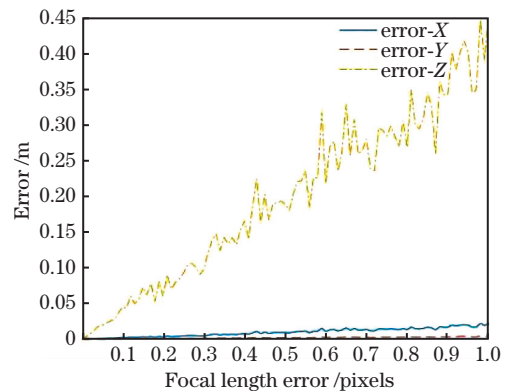


图 3 u 轴主点标定误差对 3D 坐标测量结果的影响

Fig. 3 Influence of the calibration error of u -axis main point on 3D coordinate measurement results

s_1 对右相机 v 轴主点坐标 v_{0r} 的导数可表示为

$$\frac{ds_1}{dv_{0r}} = \frac{t_1 f_x u_2 v_2}{(u_2 v_{0r} - u_2 v_0 + u_2 v_2 - u_1 v_2)^2} \quad (11)$$

在相同仿真条件下,得到误差统计的平均值如图 4 所示。可以发现,同误差水平下, v 轴主点产生的误差约为 u 轴主点的一半,当 v 轴主点的标定误差为 1 pixel 时,目标点在 X 、 Y 、 Z 方向的测量误差分别为 0.10 m、0.02 m、2.40 m。

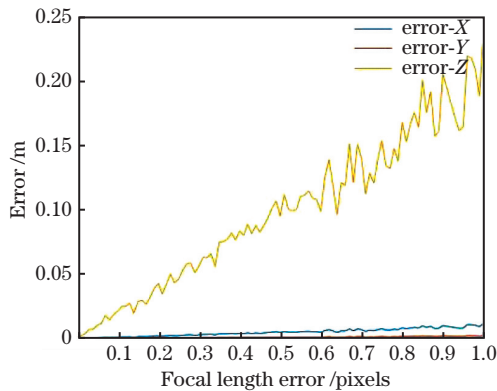


图 4 v 轴主点标定误差对 3D 坐标测量结果的影响

Fig. 4 Influence of the calibration error of v -axis main point on 3D coordinate measurement results

3.2 相机外参对测量精度的影响

系统外参包括平移参数 t_1 、 t_2 、 t_3 , 旋转向量偏航角 α 、俯仰角 β 、横滚角 θ , t_1 、 t_2 、 t_3 分别为左相机光心相对于右相机光心在 X 、 Y 、 Z 方向上的偏移

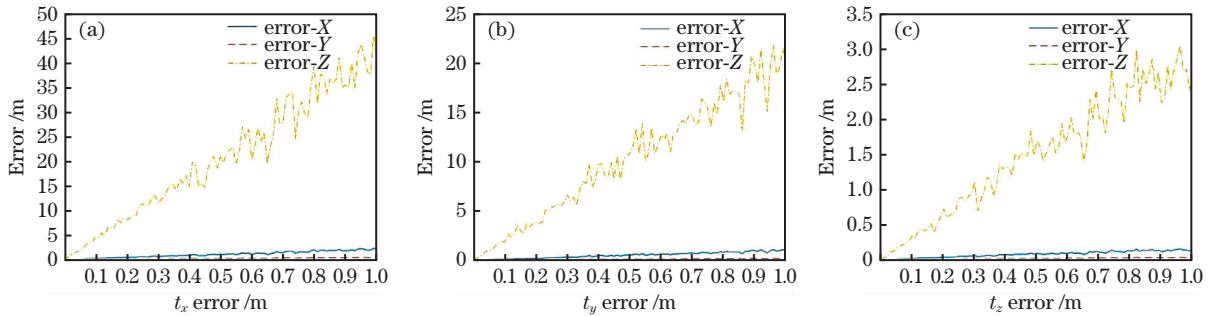


图 5 偏移向量标定误差对 3D 坐标测量结果的影响。(a) t_x ; (b) t_y ; (c) t_z

Fig. 5 Influence of offset vector calibration error on 3D coordinate measurement results. (a) t_x ; (b) t_y ; (c) t_z

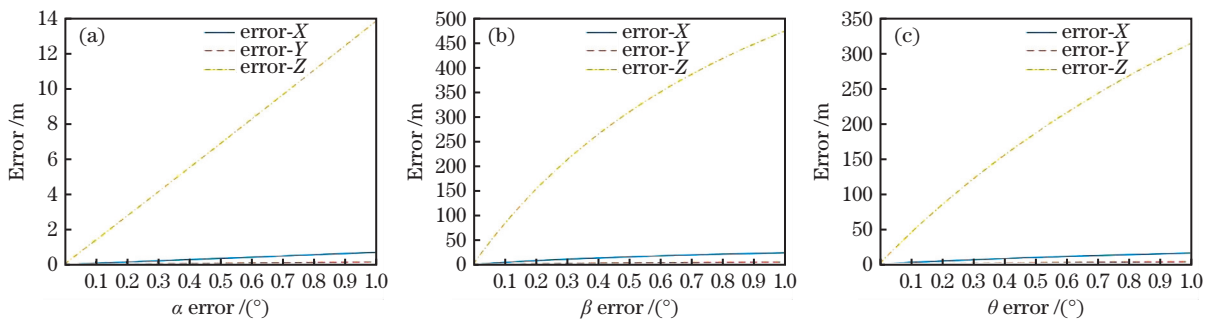


图 6 旋转角标定误差对 3D 坐标测量结果的影响。(a) α ; (b) β ; (c) θ

Fig. 6 Influence of rotation angle calibration error on 3D coordinate measurement results. (a) α ; (b) β ; (c) θ

量^[10],与 t_x 、 t_y 、 t_z 对应。用(8)式分别对平移向量中的各元素求导,得到

$$\begin{cases} \frac{ds_1}{dt_1} = \frac{-f_x}{u_1 - u_2} \\ \frac{ds_1}{dt_2} = \frac{u_2 f_x}{u_1 v_2 - u_2 v_1} \\ \frac{ds_1}{dt_3} = \frac{u_2 - u_0}{u_1 - u_2} \end{cases} \quad (12)$$

在相同仿真条件下,仿真偏移向量标定误差对坐标测量结果的影响,得到统计误差的平均值如图 5 所示。可以发现, X 方向的标定误差(基线标定误差)对系统测量精度的影响较大。

用(8)式分别对偏航角 α 、俯仰角 β 、横滚角 θ 求导,得到

$$\begin{cases} \frac{ds_1}{d\alpha} = \frac{t_1 f_x (v_0 - v_1)}{[(v_0 - v_1)\alpha + u_1 - u_2]^2} \\ \frac{ds_1}{d\beta} = \frac{t_1 f_x^2 (f_x^2 - u_0 u_1 - u_0 u_2 + u_1 u_2 + u_0^2)}{[\beta(f_x^2 - u_0 u_1 - u_0 u_2 + u_1 u_2 + u_0^2) + u_1 f_x - u_2 f_x]^2} \\ \frac{ds_1}{d\theta} = \frac{t_1 f_x^2 (u_0 v_0 - v_0 u_2 + u_0 v_1 - u_2 v_1)}{[\theta(u_0 v_0 - v_0 u_2 + u_0 v_1 - u_2 v_1) + u_1 f_x - u_2 f_x]^2} \end{cases} \quad (13)$$

由于角度误差较小,因此仿真时 $\sin x = x$ 、 $\cos x = 1$,且仿真中没有添加高斯噪声。原因是角度变化量很小,而高斯噪声中的部分幅值较大^[11]。图 6 为偏

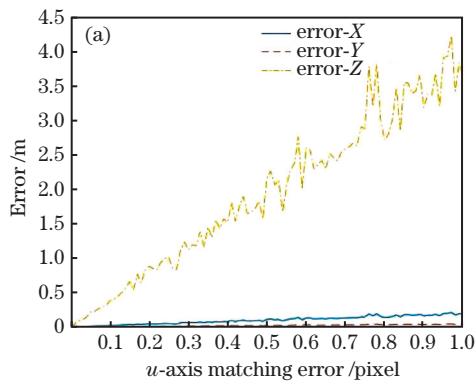
航角 α 、俯仰角 β 、横滚角 θ (变化范围均为 $0^\circ \sim 1^\circ$) 对测量结果的影响,可以发现,目标定位误差随外参标定误差的增大而增大,对 Z 方向的定位影响较大,且旋转向量标定误差对系统定位精度的影响很大。

综上所述,外参对目标定位的影响远大于内参,且实际标定过程中应尽可能提高外参的标定精度。可通过图像校正将图像行对齐,以减小测量误差。

3.3 特征点匹配误差对测量精度的影响

在图像匹配阶段会存在匹配误差,特征匹配结果对系统测量精度的影响可表示为^[12]

$$\frac{ds_1}{du_2} = \frac{-t_1 f_x}{(u_1 - u_2)^2}, \quad (14)$$



$$\frac{ds_1}{dv_2} = \frac{t_1 f_x v_1 u_2}{(v_1 u_2 - u_1 v_2)^2}. \quad (15)$$

图像特征点的提取误差能直接反映双目立体相机的匹配结果,实验过程中,对左右相机中某一个相机拍摄的图像加入噪声,如对左图像加入高斯噪声,以模拟双目立体匹配误差对 3D 坐标测量结果的影响。仿真实验中,加入的高斯噪声标准差范围为 $0 \sim 1$ pixel,在每一噪声水平下,分别进行 50 次独立实验,得到统计误差的平均值如图 7 所示。可以发现,定位误差随匹配误差的增大而线性增大。当 u 轴加入的噪声标准差为 1 pixel 时, X 、 Y 、 Z 方向的定位误差分别为 0.20 m、0.04 m、3.80 m。

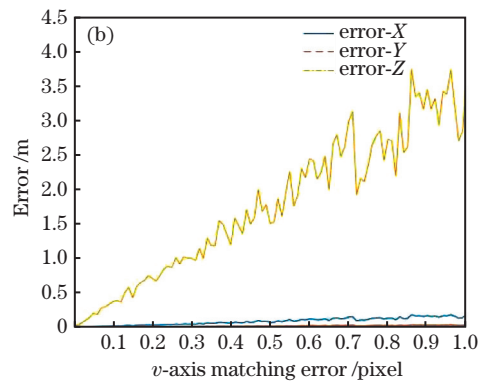


图 7 匹配误差对 3D 坐标测量结果的影响。(a) u 轴;(b) v 轴

Fig. 7 Influence of matching error on 3D coordinate measurement results. (a) u -axis; (b) v -axis

3.4 其他参数对系统精度的影响

当只存在特征匹配误差时,像元大小、焦距长度、基线长度与测量距离对系统精度的影响可表示为^[13]

$$\frac{ds_1}{du_2} = \frac{-Z_w^2 d_x}{t_1 f}, \quad (16)$$

式中, $t_1 = -B$, B 为基线长度, f 为双目相机的焦距,此时 $f_x = f_y = f$, Z_w 为目标点在世界坐标系中的 Z 坐标值, d_x 为像元大小。

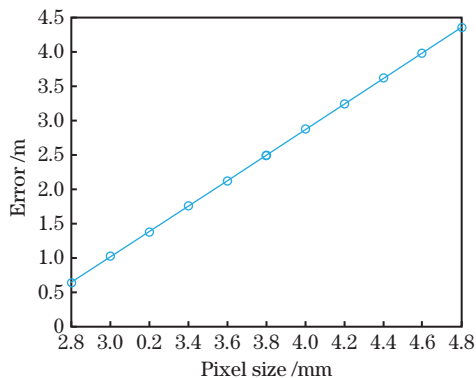


图 8 不同像元大小对 Z 方向测量结果的影响

Fig. 8 Influence of different pixel sizes on Z -direction measurement results

不同像元、不同焦距、不同基线、不同测量距离下的系统误差如图 8~图 11 所示。可以发现,基线长度 B 越大,测量距离 Z 越小,焦距 f 越大时,系统的误差越小。其中,基线长度为 $0 \sim 10$ m 时,对系统精度的影响较大。测量距离越大,对系统精度的影响也越大。这表明当特征点的匹配精度为 1 pixel 时,可通过减小像元大小、增加焦距长度、增加基线长度、减小测量距离减小系统的测量误差。

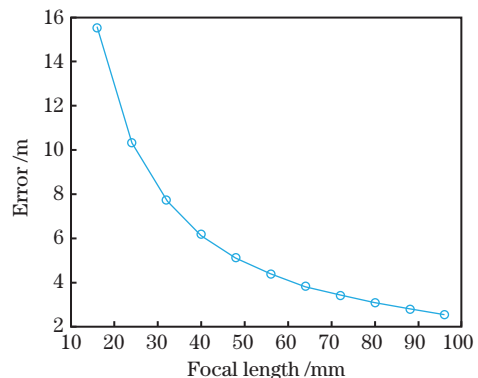


图 9 不同焦距长度对 Z 方向测量结果的影响

Fig. 9 Influence of different focal length on Z -direction measurement results

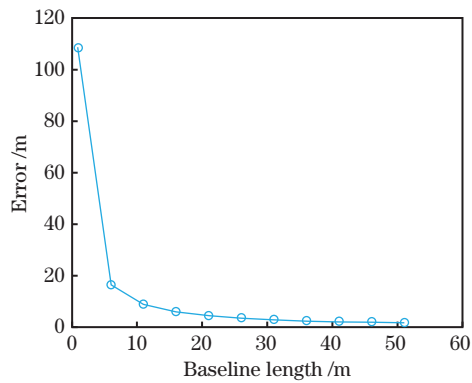


图 10 不同基线长度对 Z 方向测量结果的影响

Fig. 10 Influence of different baseline lengths on Z-direction measurement results

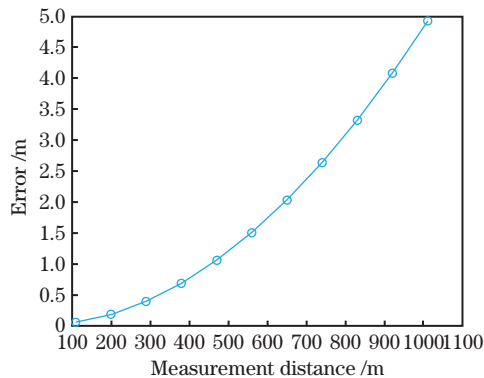


图 11 不同测量距离对 Z 方向测量结果的影响

Fig. 11 Influence of different measurement distances on Z-direction measurement results

4 结 论

通过分析双目视觉系统的测量原理,建立了各参数与测量系统 Z 方向(距离方向)的关系,为双目系统的远距离测量提供了理论依据。仿真结果表明,相比其他参数,双目视觉系统中两个相机的相对旋转关系对测量系统的影响更大。相比其他两个方向,Z 方向坐标测量的误差更大;且 Z 方向的误差随基线距离与焦距长度的增大而减小,随像元尺寸的减小而减小。

参 考 文 献

[1] Wang X J, Bian Y X, Liu F, et al. Optimization of structural parameters of binocular vision system in remote 3-D coordinate measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10): 2902-2908.
王向军, 卞越新, 刘峰, 等. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统结构参数的优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2902-2908.

[2] Liu F C, Xie M H, Yan G L. Accuracy analysis of binocular stereo vision system[J]. Computer

Engineering, 2011, 37(19): 280-282, 285.

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): 280-282, 285.

- [3] Zhang L, Zhi S. Error analysis on relative position of target of binocular measurement system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(S1): 116-122.
张刘, 支帅. 双目测量系统目标相对位置误差分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 116-122.
- [4] Liu J Y, Wang Z L, Jia Y D. Error analysis of binocular stereo vision system[J]. Optical Technology, 2003, 29(3): 354-357, 360.
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): 354-357, 360.
- [5] Li H B, Shan W J, Liu B. Research of error-model on two eyes stereoscopic measurement system [J]. Optical Technique, 2006, 32(1): 24-26, 30.
李海滨, 单文军, 刘彬. 双目立体视觉测距系统误差模型的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 24-26, 30.
- [6] Liu Z W, Zhao L H, Luo X X. Error analysis caused by the camera resolution in binocular vision measurement system[J]. Mechanical Engineer, 2016 (12): 56-58.
刘志伟, 赵立宏, 罗湘喜. 双目视觉测量系统中摄像机分辨率引起的误差分析[J]. 机械工程师, 2016 (12): 56-58.
- [7] Yu H J, Han P C. Measuring errors analysis of binocular vision system [J]. Optical Technique, 2007, 33(S1): 157-159.
余慧杰, 韩平畴. 双目视觉系统的测量误差分析[J]. 光学技术, 2007, 33(S1): 157-159.
- [8] Yan K. Research on pose measurement of space non cooperative target based on binocular vision [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
颜坤. 基于双目视觉的空间非合作目标姿态测量技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [9] Zhang G J. Vision measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008.
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [10] Olson C F, Abi-Rached H, Ye M, et al. Wide-baseline stereo vision for Mars rovers[C]//Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), October 27-31, 2003, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2003: 1302-1307.
- [11] Zhang Q Z, Wang Y. Binocular stereo vision calibration accuracy evaluation using epipolar constraint[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 231504.
张青哲, 王勇. 基于对极约束的双目立体视觉标定精

- 度评价方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 231504.
- [12] Xie Z X, Li J P, Chi S K. Underwater binocular measurement method based on line-structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0504004.
解则晓, 李俊朋, 迟书凯. 基于线结构光的水下双目测量方法[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0504004.
- [13] Xie Z X, Yu J S, Chi S K, et al. Underwater calibration and measurement based on non-parallel stereovision[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0912004.
解则晓, 余江姝, 迟书凯, 等. 非平行双目视觉系统水下标定与测量[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0912004.