

引用格式: 宁贵伟, 余薛浩. 双目视觉系统的误差模型及精度分析[J]. 飞控与探测, 2025, 8(5): 97-106.

Citation: NING G W, YU X H. Error model and accuracy analysis of binocular vision system [J]. Flight Control & Detection, 2025, 8(5): 97-106.

双目视觉系统的误差模型及精度分析

宁贵伟, 余薛浩

(上海航天控制技术研究所·上海·201109)

摘要: 针对双目视觉测量系统的精度问题, 从汇聚式和平行式两类双目视觉系统出发, 依次提出并建立误差分析模型, 分析了相机结构参数基线和焦距、镜头安装结构、标定精度、待测深度距离与测量误差的关系特性, 研究相关因素对测量误差的影响, 进行了仿真分析。仿真结果表明, 在满足视场约束条件下, 上述分析建立的误差模型, 能有效估计双目视觉系统的测量误差, 为后续的测量误差修正提供理论模型, 为搭建所需的双目视觉系统, 提供合适的结构和参数设计建议。

关键词: 双目视觉; 误差模型; 结构参数; 汇聚式模型; 平行式模型; 三维重建

中图分类号: TP212.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2025)05-0097-10

DOI: 10.20249/j.cnki.2096-5974.2025.05.011

Error Model and Accuracy Analysis of Binocular Vision System

NING Guiwei, YU Xuehao

(Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109)

Abstract: To address the problem of the accuracy of the binocular vision measurement system, this paper proposes and develops an error analysis model for convergent and parallel binocular vision systems. It analyzes the relationship between key camera structural parameters, including baseline, focal length, lens mounting structure, calibration accuracy, and the depth of the measured object and the resulting measurement errors. The study explores the impact of these factors on measurement accuracy and presents a simulation analysis. By considering the constraints of the field of view, the simulation results show that the error model established by the above analysis can effectively estimate the measurement error of the binocular vision system, and provide a theoretical model for the subsequent measurement error correction, and the suggestions for designing suitable structures and parameters for the construction of the required binocular vision system.

Keywords: binocular vision; error model; structural parameters; convergent model; parallel model; 3D reconstruction

0 引言

计算机视觉的基本问题是根据若干数量世界景物的图像,求得真实世界景物结构特点的理解。三维重建^[1-2]作为计算机视觉领域的一个重要研究方向,即从二维图像中提取三维空间信息,并构建出三维模型,在物体识别、定位与导航^[3-5]、动态重建、虚拟现实、医学影像分析^[6-7]等领域有广泛的应用。双目视觉作为一种被动三维重建方法,具有非接触^[8]、成本低、结构简单的优势,且具有在线、实时三维测量的潜力^[9]。相比于单目视觉^[10-12],鲁棒性更强且视觉效果更加真实。具体来说,通过对同一目标物体,获得不同视角的图像,并通过提取左、右目相机匹配图像,得到空间靶标特征点的匹配关系,然后利用三角测量^[13-14]的方法计算深度,进而获得特征点的三维信息。理论上双目视觉可以精确恢复深度信息,但实际应用中面对众多挑战,测量精度主要受到以下3个方面影响^[15]: 1) 双目视觉系统的内部参数,如相机镜头的非线性畸变、选取的焦距; 2) 双目视觉系统的外部参数,主要是待测目标点的空间位置和两台相机之间的结构参数,如基线、光轴夹角等; 3) 目标特征点的提取精度和立体匹配精度。对于具体的应用场景,建立的双目视觉系统结构固定,镜头参数的变化较小,目标点的空间位置变化范围已知,因此双目视觉系统的外部参数对测量精度的影响较大,同时对测量范围有影响,需要重点研究。

本文通过建立两类双目视觉系统的测量模型,依次分析结构参数、安装结构偏差、标定精度、待测目标深度对系统测量精度的影响,理论推导了误差的数学表达式并进行仿真分析。搭建双目视觉系统进行标定实验,分析标定板在视野中占比、标定图像数量、标定板在视野的空间位置对标定精度和测距误差的影响,较全面地阐述相关因素对两类双目视觉模型测量误差的影响。

1 双目视觉系统测量的数学模型

1.1 双目视觉系统成像模型

本文介绍双目视觉系统的两种模型: 双目汇聚视觉系统和双目平行视觉系统。双目汇聚视觉系统模型

如图1所示,建立如下坐标系: 左、右目相机坐标系为 $o_1x_1y_1z_1$, $o_2x_2y_2z_2$, 世界坐标系取 $o_1x_1y_1z_1$; 左、右目图像坐标系为 $O_1X_1Y_1$, $O_2X_2Y_2$ 。相机的结构参数选取: f_1 和 f_2 为左、右目相机的焦距,左、右目相机光轴与基线夹角为 α_1 和 α_2 ,空间点 P 与相机光学中心的连线与左、右目相机光轴的夹角分别为 ω_1 和 ω_2 。下标1和2用于区分左、右目相机对应的参数和变量。双目平行视觉系统是左、右目相机参数一致、两光轴平行的理想模型,如图2所示,坐标系建立与汇聚式一致。

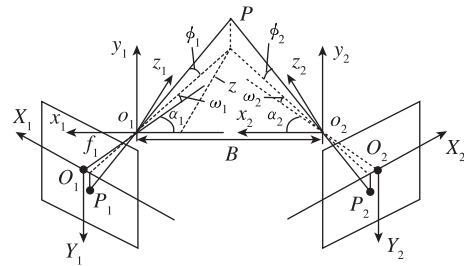


图1 汇聚式模型

Fig. 1 Convergent model

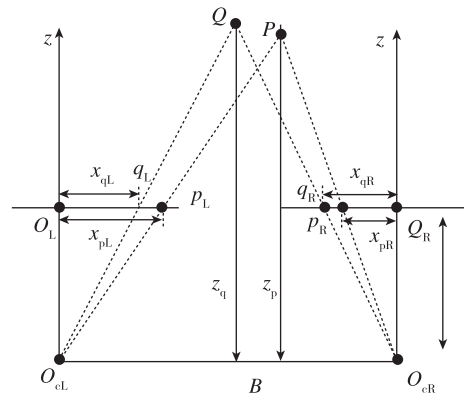


图2 平行式模型

Fig. 2 Parallel model

1.2 双目视觉系统的精度分析

假设空间点 P 在世界坐标系下的三维坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w) = (x, y, z)$, 在左、右目图像坐标系下的二维坐标 (X, Y) 分别为 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , 坐标值均为正, 则汇聚式模型和平行式模型的 P 点坐标如下, 其中 B 为双目视觉系统的基线长度, d 为 P 点在左、右目相机成像的视差。

$$\begin{cases} Z_w = \frac{B}{\cot(\omega_1 + \alpha_1) + \cot(\omega_2 + \alpha_2)} \\ X_w = \frac{B \cot(\omega_1 + \alpha_1)}{\cot(\omega_1 + \alpha_1) + \cot(\omega_2 + \alpha_2)} \\ Y_w = Y_1 \frac{z \cos \omega_1}{f_1 \sin(\omega_1 + \alpha_1)} = Y_2 \frac{z \cos \omega_2}{f_2 \sin(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Z_w = \frac{Bf}{d} \\ X_w = \frac{Z_w X_1}{f} \\ Y_w = \frac{Z_w Y_1}{f} \end{cases} \quad (2)$$

取 δ_k 表示各个变量的误差, 包括视觉系统基线 B 、相机焦距 f 、相机光轴与基线的夹角 α 、 P 点在左目相机系下的深度 z , 以及在左、右目相机像面的坐标 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) 。根据误差的传递及合成理论, 世界坐标系下 P 点 x, y, z 轴 3 个方向误差 $\Delta X_w, \Delta Y_w, \Delta Z_w$ 为

$$\begin{cases} \Delta Z_w = \sum_k \frac{\partial Z_w}{\partial k} \delta_k \\ \Delta X_w = \sum_k \frac{\partial X_w}{\partial k} \delta_k \\ \Delta Y_w = \sum_k \frac{\partial Y_w}{\partial k} \delta_k \end{cases} \quad (3)$$

$k = B, \alpha, f, X_1, Y_1, X_2, Y_2, z$

P 点在三维空间中综合测量误差为

$$\Delta = \sqrt{(\Delta X_w)^2 + (\Delta Y_w)^2 + (\Delta Z_w)^2} \quad (4)$$

本文研究所用的视觉系统参数见表 1, 左、右目相机基线 B 为 200 mm。

表 1 双目相机参数

Tab. 1 Binocular camera parameters

参数	双目视觉系统左目相机	双目视觉系统右目相机
视场角/ (°)	22×18	22×18
焦距/mm	12	12
分辨率	1 280×720	1 280×720
像素大小/ μm	3.75	3.75
帧率/ (帧/s)	60	60

2 双目视觉系统结构参数及待测深度引起的误差

对于汇聚式模型, 根据式 (1) 建立的测量模

型, 以左目相机为例, 分析 x, y, z 轴方向, 依次对 X_w, Y_w, Z_w 求偏导, 求解测量误差的传递系数

$$\begin{cases} \frac{\partial X_w}{\partial X_1} = \frac{-z^2 \cot(\omega_2 + \alpha_2) \cos^2 \omega_1}{B f_1 \sin^2(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial X_w}{\partial X_2} = \frac{-z^2 \cot(\omega_1 + \alpha_1) \cos^2 \omega_2}{B f_2 \sin^2(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial Z_w}{\partial X_1} = \frac{z^2 \cos^2 \omega_1}{B f_1 \sin^2(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial Z_w}{\partial X_2} = \frac{z^2 \cos^2 \omega_2}{B f_2 \sin^2(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial Y_w}{\partial X_1} = \frac{z^2 \tan \varphi_1 \cos^2 \omega_1}{B f_1 \sin^3(\omega_1 + \alpha_1)} = \frac{y z \cos^2 \omega_1}{B f_1 \sin^2(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial Y_w}{\partial X_2} = \frac{z^2 \tan \varphi_2 \cos^2 \omega_2}{B f_2 \sin^3(\omega_2 + \alpha_2)} = \frac{y z \cos^2 \omega_2}{B f_2 \sin^2(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial Y_w}{\partial Y_1} = \frac{z \cos \omega_1}{f_1 \sin(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial Y_w}{\partial Y_2} = \frac{z \cos \omega_2}{f_2 \sin(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (8)$$

因而 P 点在 x, y, z 轴方向测量精度合成为

$$\begin{cases} \Delta X_w = \sqrt{\left(\frac{\partial X_w}{\partial X_1} \Delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial X_w}{\partial X_2} \Delta X_2\right)^2} \\ \Delta Y_w = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_w}{\partial X_1} \Delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial X_2} \Delta X_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial Y_1} \Delta Y_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial Y_2} \Delta Y_2\right)^2} \\ \Delta Z_w = \sqrt{\left(\frac{\partial Z_w}{\partial X_1} \Delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial X_2} \Delta X_2\right)^2} \end{cases} \quad (9)$$

假设 $\delta = \Delta X_1 = \Delta X_2 = \Delta Y_1 = \Delta Y_2$, 结合误差公式, 依次分析相机的结构参数基线、焦距、相机光轴与基线夹角对相机精度的影响。取焦距 $f_1 = f_2 = f$, 夹角 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, 水平投影角 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, 垂直投影角 $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ 。简化模型后, 分析系统测量误差。

对于平行式模型, 根据式 (2) 建立的测量模型, 进行精准定量的误差分析。假设像元在 x, y 方向的检测精度一致, 视差 d 的精度 δ_d 用 x, y 方向的检测精度估计, 即 $\sqrt{2} \Delta X_1 = \sqrt{2} \Delta Y_1 = \delta_d$ 。求解出 x, y, z 三轴方向的测量误差为

$$\begin{cases}
\Delta X_w = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial X_w}{\partial Z_w} \Delta Z_w\right)^2 + \left(\frac{\partial X_w}{\partial X_1} \Delta X_1\right)^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{X_1}{f} \cdot \frac{\partial Z_w}{\partial d} \delta_d\right)^2 + \left(\frac{Z_w}{f} \Delta X_1\right)^2} \\
= \pm \sqrt{\left(\frac{X_1}{f} \cdot \frac{\sqrt{2} Z_w \delta}{Bf}\right)^2 + \left(\frac{Z_w}{f} \delta\right)^2} = \pm \sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{2} X_w}{B}\right)^2} \frac{Z_w \delta}{f} \\
\Delta Y_w = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Y_w}{\partial Z_w} \Delta Z_w\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial Y_1} \Delta Y_1\right)^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{Y_1}{f} \cdot \frac{\partial Z_w}{\partial d} \delta_d\right)^2 + \left(\frac{Z_w}{f} \Delta Y_1\right)^2} \\
= \pm \sqrt{\left(\frac{Y_1}{f} \cdot \frac{\sqrt{2} Z_w \delta}{Bf}\right)^2 + \left(\frac{Z_w}{f} \delta\right)^2} = \pm \sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{2} Y_w}{B}\right)^2} \frac{Z_w \delta}{f} \\
\Delta Z_w = \pm \left| \frac{\partial Z_w}{\partial d} \delta_d \right| = \pm \frac{\sqrt{2} Z_w \delta}{Bf}
\end{cases} \quad (10)$$

2.1 汇聚式系统基线和光轴与基线的夹角对测量精度的影响

基线的变化直接影响相机位置和测量精度，光轴与基线的夹角限制两个相机的摆放姿态。基线变大后，为保证有效视场范围，测量角 $\alpha + \omega$ 也会变大，使得基线对测量精度的影响为非线性变化。由式 (1)、式 (9) 知双目视觉系统结构参数综合误差传递函数为

$$\begin{cases}
\theta = \omega + \alpha \\
\phi_B = \sqrt{\frac{\cos(2\theta) - 1}{\cos(4\theta) - 1}} \\
\phi_\alpha = \sqrt{\frac{\left(\frac{B(\cot^2\theta + 1)}{4 \cot^2\theta}\right)^2 + \left(\frac{B \cot\theta(\cot^2\theta + 1)}{4 \cot^2\theta}\right)^2 + \left(\frac{B \cot\theta \tan\phi}{2 \sin^2\theta \cot\theta}\right)^2}{}}
\end{cases} \quad (11)$$

由式 (4) 可得基线 B 和光轴与基线的夹角 α 对双目视觉系统测量综合误差的影响如图 3、图 4 所示。显然，当基线与光轴夹角 α 一定时，基线 B 增大，系统测量误差减小； B 的变化对误差影响比 α 更显著； α 在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间时，双目视觉系统测量误差较小，精度较高。取水平投影角 $\omega = 0$ ，进一步简化模型，分析可得结构参数基线 B 和夹角 α 的误差传递规律：1) 两相机基线 B 的误差对双目视觉系统测量误差的影响，取决于与光轴的夹角，且与其余弦值成反比。2) 基线与光轴夹角的误差传递函数与基线 B 成正比。3) 基线和夹角 α 的误差传递系数随着垂直视场角的减小而减小， ϕ_B 与其余弦值成反比， ϕ_α 与其正切值成正比，因而当垂直视场为 0° 时，即被测点 P 在视平面内，误差最小。

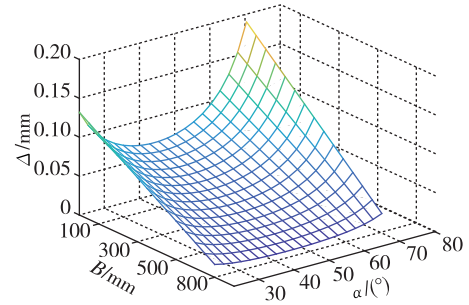


图 3 基线 B 、基线与光轴夹角 α 对误差的影响
Fig. 3 The effect of the baseline B , the angle α between the baseline and the optical axison the error

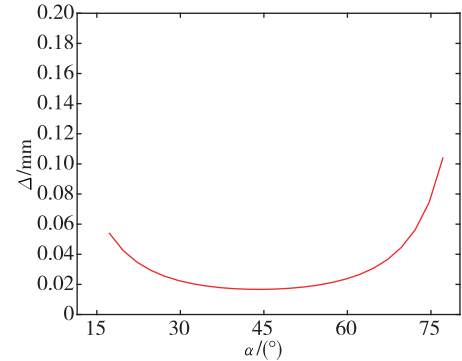


图 4 基线与光轴夹角 α 对误差的影响
Fig. 4 The effect of the angle α between the baseline and the optical axis on the error

2.2 汇聚式系统焦距对测量精度的影响

双目视觉系统的焦距与视场范围有关，因此需要选择合适的相机焦距，调整有效视场的大小，以确保待测目标视场所需的像元数量足够，且在整个测量过程中，待测目标需要始终在视场内。假设 z 为沿垂直于基线 B 的视场方向的距离，系统要满足以下 3 个约束。

1) 可观测约束: 保证待测目标可被左、右目相机同时观测到。假设待测目标特征点在左、右目相机基线为 B , 水平、垂直视角均为 α , 光轴和基线夹角的余角为 β , 水平可观测距离为 W , 根据深度划分 3 个区域为 I: $z \leq d_1$, II: $d_1 < z \leq d_2$, III: $d_2 < z$, 如图 5 所示, 其中阴影部分为汇聚式双目视觉系统的水平可观测区域, 显然区域 I 是视野盲区, 无法进行视觉投影成像。

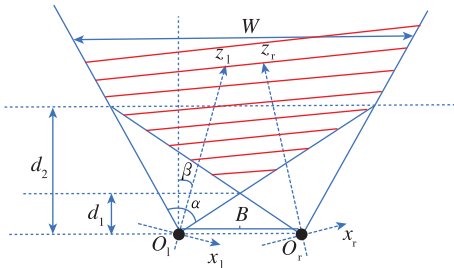


图 5 汇聚式模型可观测区域
Fig. 5 Convergent model observable area

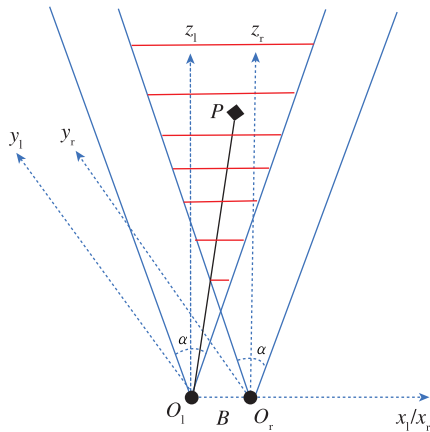


图 6 平行式模型可观测区域
Fig. 6 Parallel model observable area

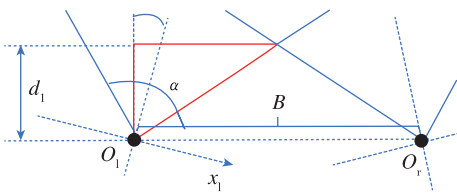


图 7 区域 I 约束
Fig. 7 Constraints of area I

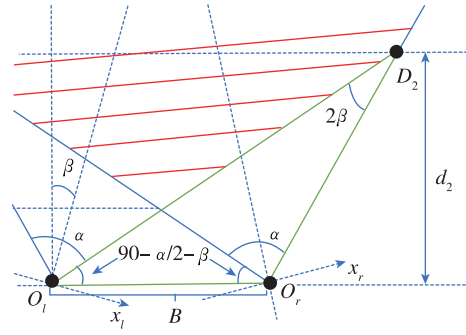


图 8 区域 II 约束
Fig. 8 Constraints of area II

假设左、右目相机的光心为 O_l, O_r , 相机右侧极限视线交点为 D_2 , 线段 $O_l D_2$ 长度为 l , 根据图 7、图 8 的实线三角形几何关系, 容易得到可观测区域宽度 W 的约束如下

$$\begin{cases} d_1 = \frac{B}{2 \tan\left(\beta + \frac{\alpha}{2}\right)} \\ \frac{d_2}{l} = \sin\left(90 - \frac{\alpha}{2} - \beta\right) \\ \frac{B}{\sin 2\beta} = \frac{l}{\sin\left(90 + \frac{\alpha}{2} - \beta\right)} \end{cases} \quad (12)$$

化简可求得深度的区域边界

$$\begin{cases} d_1 = \frac{B}{2 \tan\left(\beta + \frac{\alpha}{2}\right)} \\ d_2 = \frac{(\cos \alpha + \cos 2\beta) B}{\sin 2\beta} \end{cases} \quad (13)$$

显然, 对于可观测区域 II, 有几何关系 $\frac{W}{2(z - d_1)} = \tan\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right)$; 而可观测区域 III, 有几何关系 $\frac{W}{2} = z \tan\left(\frac{\alpha}{2} - \beta\right) + \frac{B}{2}$ 。代入式(13)后得到深度距离为 z 时, 区域 II, III 的水平可观测宽度分别为 $W = 2z \tan\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right) - B, W = 2z \tan\left(\frac{\alpha}{2} - \beta\right) + B$, 以此约束设计系统相机的焦距和视角。

2) 异特征点可分辨约束: 即对于待检测目标, 在左、右目成像平面上, 任意两个目标特征点的投影坐标距离大于一个像素距离。当假设成像平面在 x, y 方向上的像素处理精度分别为 d_x 和 d_y 时, 以下标 1, 2 区分异特征点的投影坐标。异特

征点可分辨约束为 $|u_1 - u_2| > d_x$ 或 $|v_1 - v_2| > d_y$ ，代入式 (2) 得

$$f \left| \frac{X_{w1}Z_{w2} - X_{w2}Z_{w1}}{Z_{w1}Z_{w2}} \right| > d_x$$

$$f \left| \frac{Y_{w1}Z_{w2} - Y_{w2}Z_{w1}}{Z_{w1}Z_{w2}} \right| > d_y \quad (14)$$

3) 视差像素可分辨约束：即对于同一特征点，在左、右目成像平面上的投影点距离大于一个像素的距离。当假设成像平面在 x, y 方向上的像素处

$$\begin{cases} \varphi_f = \sqrt{\left(\frac{B \tan \omega (\cot^2 \theta + 1)}{4f(\tan^2 \omega + 1) \cot^2 \theta} \right)^2 + \frac{z^2 \tan^2 \phi (\cot 2\alpha - 1)}{2f^2 \sin^4 \theta \cos^4 \omega (\tan^2 \omega + 1)^3} + \left(\frac{B \cot \theta \tan \omega (\cot^2 \theta + 1)}{4f(\tan^2 \omega + 1) \cot^2 \theta} \right)^2} \\ \theta = \omega + \alpha \end{cases} \quad (16)$$

对误差的影响仿真，如图 9 所示，可知综合考虑视场因素的情况下，即满足上述的约束条件下，在允许的焦距设计范围内，系统误差随焦距的增大而减小，当误差减小至一定程度后，系统精度没有显著的提升。

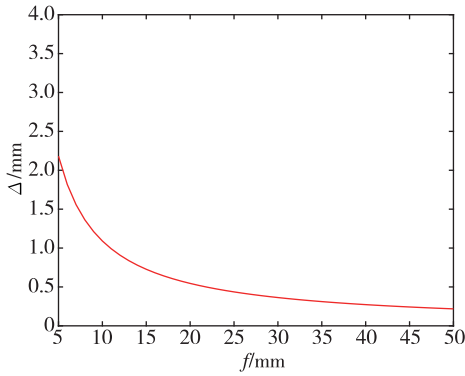


图 9 焦距 f 对误差的影响

Fig. 9 The effect of focal length f on the error

2.3 平行式系统基线和焦距对测量精度的影响

对于平行式模型，需要满足的异特征点、视差像素可分辨约束，与汇聚式一致，而可观测性约束不同。假设目标 P 在左、右目相机坐标系的坐标为 (x_l, y_l, z_l) , (x_r, y_r, z_r) ，相机的视角均为 α ，可观测区域如图 6 的阴影部分。根据约束条件式 (17)，设计适合的焦距和基线。

$$\begin{cases} \frac{z_l}{\sqrt{x_l^2 + y_l^2 + z_l^2}} > \cos \frac{\alpha}{2} \\ \frac{z_r}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}} > \cos \frac{\alpha}{2} \end{cases} \quad (17)$$

由式 (10) 知，随着系统的基线和焦距的增

大，测量误差减小；随着待测目标深度的增大，测量误差呈二次函数型增长。根据表 1 参数，假设像元检测精度为 0.18 个像素，对目标在 100 m 处的测量误差，受相机基线和焦距的影响，进行仿真分析，如图 10、图 11 所示。

理精度分别为 d_x 和 d_y 时，以下标 3, 4 区分同一特征点左、右目相机的投影坐标和左、右目相机的焦距。视差像素可分辨约束为 $|u_3 - u_4| > d_x$ 或 $|v_3 - v_4| > d_y$ ，代入式 (1) 得

$$\frac{Y_w}{z} \left| \frac{f_1 \sin(\omega_1 + \alpha_1)}{\cos \omega_1} - \frac{f_2 \sin(\omega_2 + \alpha_2)}{\cos \omega_2} \right| > d_y \quad (15)$$

对于满足约束的汇聚式双目视觉系统，由式 (1)、式 (3) 可知结构参数焦距 f 的综合误差传递函数为

大，测量误差减小；随着待测目标深度的增大，测量误差呈二次函数型增长。根据表 1 参数，假设像元检测精度为 0.18 个像素，对目标在 100 m 处的测量误差，受相机基线和焦距的影响，进行仿真分析，如图 10、图 11 所示。

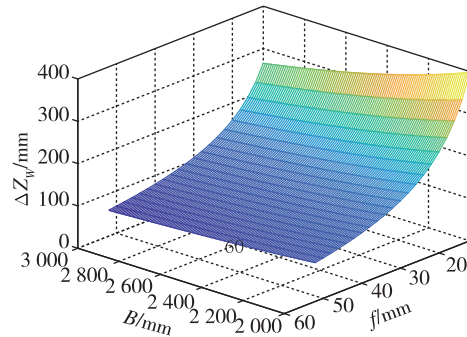


图 10 z 方向误差曲线

Fig. 10 Error curve in the z direction

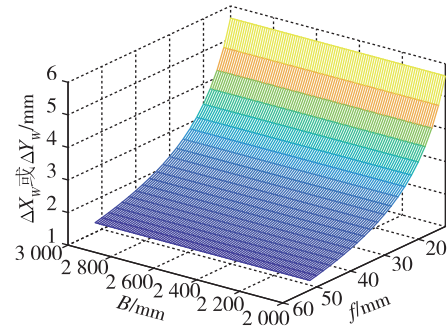


图 11 x 或 y 方向误差曲线

Fig. 11 Error curve in the x or y direction

由相机标定修正基线和焦距的误差，仅考虑

像元检测误差, 令 $k_1 = \frac{Z}{B}$, $k_2 = \frac{Z}{f}$, 其含义分别为基高比的倒数和影像尺度。为了减小 z 轴方向测量误差, 应选择更大的相机焦距, 减小影响尺度; 加大基高比; 减小像元位置检测误差 δ 。在此基础上经简化后, 可用于误差评估的模型如下

$$\begin{cases} \Delta X_w = \pm \delta_x k_2 \\ \Delta Y_w = \pm \delta_y k_2 \\ \Delta Z_w = \pm \delta_d k_1 k_2 \end{cases} \quad (18)$$

2.4 待测深度对测量精度的影响

对于双目视觉系统, 当目标深度 z 增大时, 固定视角下拍摄的范围增大, 相机的成像范围变大, 像面上单个像元所对应的实际尺寸随之变大, 所检测单个像元的位置误差增大, 特征点的定位精度减小, 进而增大测量误差。由表 1 和式 (4)、式 (9) ~ 式 (10) 可得, 待测深度 z 对双目视觉系统综合误差的影响, 如图 12 所示。很显然, 固定基线 B 和基线与光轴的夹角 α 时, 随着待测目标与双目视觉系统基线中心深度距离的增大, 系统测量误差近似二次函数型增长。

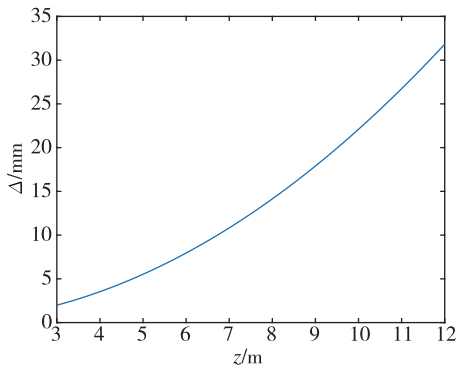


图 12 待测深度 z 对误差的影响

Fig. 12 The effect of the depth z to be measured on the error

3 相机镜头安装内部结构引起的误差

相机在安装和调试的过程中, 每个透镜的光心并非完全在同一条直线上形成共同的光轴, 同时成像平面与光轴实际不垂直, 使得实际成像点的位置偏离理想模型下的成像位置。由于相机组件的加工、设计、拼装等原因, 导致实际像面与理想像面存在偏角 θ 和水平位置偏移 Δf , 使靶标特征点在像面上的成像偏差分别为 Δd_2 和 Δd_1 , 如图 13 所示, 可

得: $\Delta d_1 = \Delta f \tan \alpha_1$, $\Delta d_2 = \frac{f \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \theta)} - f \tan \alpha_1$ 。

结合相机内部结构参数分析, 评估安装等因素, 使偏角 $\theta \leq 0.0573^\circ$ 、水平位移 $\Delta f \leq 0.7 \mu\text{m}$ 时, 根据视场角取 $\alpha_1 \in [0, 11^\circ]$ 覆盖完整像面, 利用仿真求得实际像面与理想像面的特征点成像坐标, 产生偏离的影响如图 14、图 15 所示。

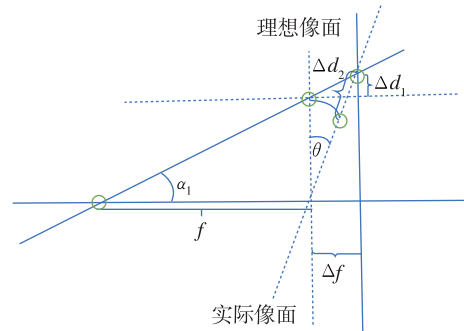


图 13 相机偏差模型

Fig. 13 Camera deviation model

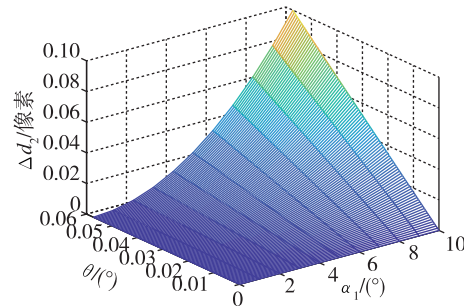


图 14 像面偏角 θ 对误差的影响

Fig. 14 The effect of image plane deviation angle θ on the error

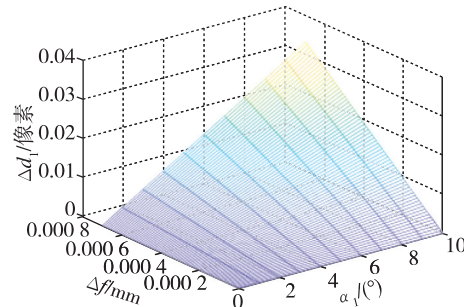


图 15 像面偏移 Δf 对误差的影响

Fig. 15 The effect of image plane offset Δf on the error

显然, 相机安装调试所产生的像面偏角造成的像元偏差低于 0.1 个像素, 且对于像面中心附近的位置像元偏差低于 0.05 个像素; 像面水平偏

移位置造成的像元偏差低于 0.035 个像素，且对于像面中心附近的位置像元偏差低于 0.02 个像素。通过以上综合分析，双目视觉系统的单个安装误差因素，对成像点坐标造成的误差可以忽略不计，但多因素同时作用时，应尽可能控制误差因素在最优范围内。

4 相机标定精度引起的误差

带来误差的相机镜头畸变主要分为径向畸变和切向畸变，需要双目视觉系统进行标定。通过数据拟合，重复修正相机内外参数，实现重投影误差的优化，确定最终的参数。相机标定后，在左目相机深度距离 2.8 m 处放置目标棋子，比较

棋子沿相机坐标系 z 轴方向移动 10 cm 前后，棋子三维坐标测量值的变化，以此试验分析各标定因素的影响。

4.1 标定板在视野中占比大小的影响

在相机标定的过程中，标定板在相机视野中占据的像元数量，与标定板的大小和标定时相机距离远近有关。取在固定距离下，以单个固定大小棋盘格的数量，衡量标定板在视野中的占比。选用 5×7 ， 7×9 ， 9×11 不同数量规格的标定板，同一相对位置标定后，试验的测量数据如表 2 所示。显然，棋盘格的数量越多，相机标定的基线越接近真实值， z 轴方向位移量的测量误差越小，三维坐标的综合误差越小。

表 2 不同尺寸标定板对测量误差的影响

Tab. 2 The effect of different size calibration plates on the measurement error

棋盘格数量	棋子移动前测量 三维坐标/mm	棋子移动后测量 三维坐标/mm	基线测量值/mm	基线误差/mm	Z 轴方向误差/mm	综合误差/mm
5×7	(38, 57, 3 367)	(34, 49, 3 485)	250.313	50.313	18	20.1
7×9	(70, 35, 2 471)	(67, 30, 2 579)	191.855	8.145	8	9.9
9×11	(84, 38, 2 753)	(83, 36, 2 855)	202.328	2.328	2	3.0

假设标定板在视场中的占比至少为 $1/3$ ，双目视觉系统参数与表 1 一致，根据 3.2 节中的可观测约束条件，标定板长度随着放置距离 z 的变化曲线如图 16 所示，以此选取合适尺寸的标定板，从而保证视场占比和标定精度。

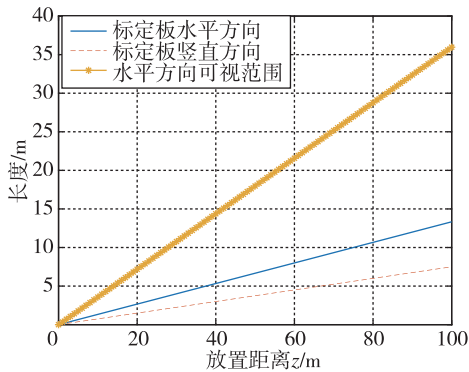


图 16 标定板尺寸、可观测范围与放置距离 z 的关系

Fig. 16 The relationship between the size of the calibration plate, the observable range and the placement distance z

4.2 标定图像数量对测量精度的影响

不同数量的标定图像，影响校正的误差值，其中基线和主点像素坐标的标定很关键。同一相对位置采集 18 张标定图像，然后选出 N 张用于标定，得到图 17、图 18 所示基线和主点像素坐标 (X , Y) 的误差关系。

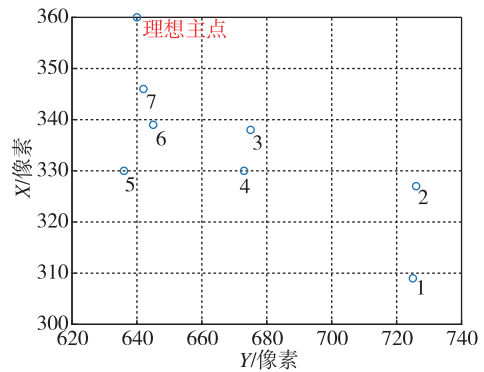


图 17 标定主点与理想主点偏移情况

Fig. 17 The deviation between the calibration principal point and the ideal principal point

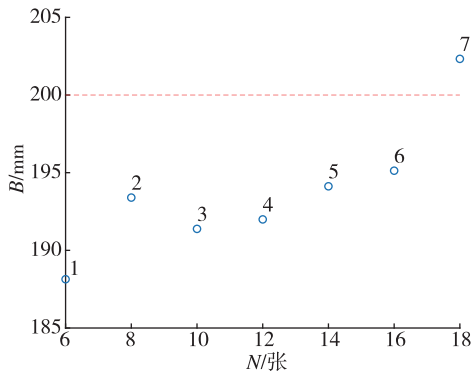


图 18 标定图像数量对标定基线的影响

Fig. 18 The effect of the number of calibration images on the calibration baseline

试验得到的误差曲线如图 19 所示。随着标定图像数量的增加, 重投影误差逐渐减小, 且标定图像数量为 10 时, 误差趋于稳定, 但随着标定图像数量的增加, 可能会出现过拟合的现象, 因此标定图像数量应在 10~14 幅为宜。

4.3 标定板位置的影响

标定板必须始终放置在相机的交汇视野中,

如图 5、图 6 的阴影区域所示。为保证图像的有效性, 根据 5.1 节标定板所需的视野占比, 使标定板填充视野达到 25%~40%。在试验中, 分别将标定板放置在相机视野区域的边界中点附近、角落附近、随机位置分布 3 种区域, 采集 10 张标定图像, 获得表 3 所示的相机参数和测量误差。

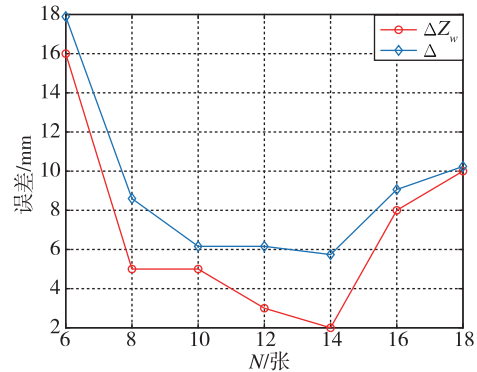


图 19 标定图像数量对测量误差的影响

Fig. 19 The effect of the number of calibration image on the measurement error

表 3 标定板放置不同位置对测量误差的影响

Tab. 3 The effect of different positions of the calibration plate on the measurement error

棋盘格位置	棋子移动前测量 三维坐标/mm	棋子移动后测量 三维坐标/mm	基线测量值/mm	基线误差/mm	Z 轴方向偏移/mm	综合误差/mm
中点	(19, -40, 2 758)	(16, -44, 2 640)	198.330	1.670	18	18.7
角落	(18, -42, 2 753)	(15, -45, 2 637)	199.485	0.515	16	16.6
随机	(16, -47, 2 720)	(18, -48, 2 625)	200.031	0.031	5	5.5

当标定板在视野范围内随机分布时, 重投影误差和测量误差是最小的, 这是因为标定板均匀分布在整个视场中, 而不是只聚集占有局部的区域, 对标定靶标的设计摆放, 提供一定的参考和指导。

5 结论

本文针对两类双目视觉系统, 在单个像元检测精度一定的情况下, 具体分析双目相机基线长度、安装结构、视场要求、焦距、标定精度等因素对测量精度的影响, 经一系列简化, 理论分析得到双目视觉系统测量误差与上述参数之间的表达式。分析了两类双目视觉系统可视范围与结构参数之间的关系, 并以此选取合适大小的标定板。

最终试验结果表明, 适当增加标定图像数目、在视野中提高标定板的占比和改善分布位置, 能有效提高系统精度, 为双目视觉系统的结构参数选取、参数误差标定修正、后续三维位置测量误差修正提供了模型, 具有参考意义。

参考文献(References)

[1] HERMANN M, WEINMANN M, NEX F, et al. Depth estimation and 3D reconstruction from UAV-borne imagery: evaluation on the UseGeo dataset[J]. ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, 13: 100065.

[2] 吴雷, 黄斌, 李旺灵, 等. 无人机位姿测量的点特征视觉方法[J]. 飞控与探测, 2019, 2(1): 37-42.

WU L, HUANG B, LI W L, et al. Point feature vi-

- sion method for UAV pose measurement[J]. *Flight Control & Detection*, 2019, 2(1): 37-42 (in Chinese).
- [3] 龙霄潇,程新景,朱昊,等.三维视觉前沿进展[J]. *中国图象图形学报*, 2021, 26(6): 1389-1428.
LONG X X, CHENG X J, ZHU H, et al. *Frontiers of 3D vision*[J]. *Chinese Journal of Image and Graphics*, 2021, 26(6): 1389-1428 (in Chinese).
- [4] 袁珊,瞿安朝,钱伟行,等.一种结合深度学习的运动去模糊视觉SLAM方法[J]. *飞控与探测*, 2022, 5(3): 28-36.
YUAN S, QU A C, QIAN W X, et al. A motion deblurring visual SLAM method combined with deep learning[J]. *Flight Control & Detection*, 2022, 5(3): 28-36 (in Chinese).
- [5] HUA L, WU X, GU J. Optimization of intelligent guided vehicle vision navigation based on improved YOLOv2[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2024, 95(6): 065110.
- [6] 钱敏,吴梦婕.基于磁共振影像的颞下颌关节三维模型重建的研究现状[J]. *口腔医学*, 2023, 43(10): 930-934.
QIAN M, WU M J. Research status of 3D model reconstruction of temporomandibular joint based on magnetic resonance image[J]. *Stomatology*, 2023, 43(10): 930-934 (in Chinese).
- [7] RICHTER A, STEINMANN T, ROSENTHAL C J, et al. Advances in real-time 3D reconstruction for medical endoscopy[J]. *Journal of Imaging*, 2024, 10(5): 120.
- [8] 杨洪涛,何海双,李莉,等.双目立体视觉测量系统的精度分析[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(10): 58-61, 69.
YANG H T, HE H S, LI L, et al. Precision analysis of binocular stereo vision measurement system[J]. *Sensors and Microsystems*, 2020, 39(10): 58-61, 69 (in Chinese).
- [9] ZHANG W, SONG P, BAI Y, et al. Non-systematic noise reduction framework for ToF camera[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 180: 108324.
- [10] WANG J, HAN L, JIANG Y, et al. Monocular visual obstacle avoidance method for autonomous vehicles based on YOLOv5 in multi lane scenes[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 109: 497-507.
- [11] DENG H, LI D, SHEN B, et al. Absolute velocity estimation of UAVs based on phase correlation and monocular vision in unknown GNSS-denied environments[J]. *IET Image Processing*, 2024, 18(12): 3218-3230.
- [12] JIANG Z, SU R, LIU Y, et al. Accurate relative measurement of multitarget poses by monocular vision for nonmodel-based real-time calibration of industrial robot[J]. *Measurement*, 2024, 235: 114979.
- [13] 张晓玲,程荣波,唐荣芳.基于双目视觉的车距测量系统[J]. *信息与电脑(理论版)*, 2023, 35(10): 144-146.
ZHANG X L, CHENG R B, TANG R F. Vehicle distance measurement system based on binocular vision[J]. *Information and Computer(Theoretical Edition)*, 2023, 35(10): 144-146 (in Chinese).
- [14] FANG Z, GUO J, XIAO Y, et al. Error-bounded image triangulation[J]. *Computer Graphics Forum*, 2023, 42(7): 014967.
- [15] 毕超,郝雪,鄂玛兰,等.基于误差模型的双目视觉系统测量精度分析[J]. *航空精密制造技术*, 2020, 56(2): 1-4, 30.
BI C, HAO X, E M L, et al. Measurement accuracy analysis of binocular vision system based on error model [J]. *Aeronautical Precision Manufacturing Technology*, 2020, 56(2): 1-4, 30 (in Chinese).