

·前沿技术与交叉科学·

非相干成像双目视觉系统的误差分析*

黄宏疆, 王鑫, 储修祥

(浙江农林大学 理学院, 杭州 311300)

摘 要: 影响双目视觉系统测量精度的因素很多, 目前系统结构参数对测量精度的影响主要有光轴与基线的夹角、基线距离、水平视角、物距以及透镜焦距等。由于孔径尺寸直接影响成像分辨率, 是决定双目视觉测量精度的核心因素, 因此依据非相干成像理论, 对双目成像过程进行仿真和实验, 采用加速鲁棒特征算法对所成的图像对进行特征提取与匹配, 获取其视差值, 并且计算其视差均方根误差来表征系统误差。研究结果表明, 系统误差随着透镜孔径大小的增大而减小, 并且趋于饱和。该研究可以为双目系统设计过程中系统参数和孔径尺寸的选取提供理论和实验依据。

关键词: 非相干成像; 双目视觉; 系统误差; 成像孔径; 特征提取与匹配

中图分类号: O438

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210045

Error analysis of incoherent imaging binocular vision system

Huang Hongjiang, Wang Xin, Chu Xiuxiang

(School of Sciences, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: There are many factors that affect the measurement accuracy of binocular vision system. Currently, the influence of system structure parameters on the measurement accuracy mainly includes the angle between optical axis and baseline, baseline distance, horizontal viewing angle, object distance and lens focal length. Since the aperture size directly affect the imaging resolution, it is the core factor that determines the accuracy of binocular vision measurement. Consequently, according to the incoherent imaging theory, the binocular imaging process is simulated and tested. Moreover, Speeded Up Robust Features algorithm is adopted to extract and match the features of the image pairs to obtain their parallax values. The parallax root mean square error is calculated to represent the systematic errors. The results show that the system error decreases with the increase of lens aperture, and approaches saturation. This research can provide theoretical and experimental basis for the selection of system parameters and aperture size during the design of the binocular system.

Key words: incoherent imaging; binocular vision; system error; imaging aperture; feature extraction and matching

近年来, 随着计算机以及相关学科技术的发展, 基于机器视觉的测量技术越来越受到关注。双目视觉测量技术因其设备简单、成本低、非接触测量、操作方便, 以及具有实时、在线测量的潜力, 广泛应用于工业生产、物体识别、工件测量、机器人自动导航、无人驾驶和航天等多个领域^[1]。

影响双目视觉系统的测量精度因素有: 特征点的提取与匹配、摄像机标定误差以及系统结构参数的选取^[2]。在相机标定、目标识别、特征点提取、立体匹配等方面得到了较为充分的研究, 而系统结构参数对测量精度影响的研究则比较少。大多机器视觉系统的搭建是靠人为经验来选择的, 可以参考的资料很少。例如: 闵新力等人首次在理论上系统、详尽地分析了系统结构参数与系统误差之间的关系, 并通过实验对结论进行了验证^[3]; 赵萍等人给出了在设计双目视觉系统时, 光轴的夹角应该在 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$, 基线距离应该在 $300\sim 500\text{ mm}$ 的结论^[4]; 肖志涛等

* 收稿日期: 2021-02-07; 修订日期: 2021-08-29

基金项目: 湖南省高能激光技术重点实验室基金项目(GNJGJS06)

联系方式: 黄宏疆, 13025580682@163.com。

通信作者: 储修祥, chuxiuxiang@aliyun.com。

人从理论上分析了摄像机标定、镜头参数以及系统结构参数对双目视觉测量系统的影响,并用实验验证了理论分析的准确性^[5]; Yu Huan 等人通过 Matlab 软件仿真,分析了平行双目立体视觉系统的水平视角、基线距离、透镜焦距等结构参数对测量误差的影响,并且得到了每个参数在特定范围内的测量误差最小^[6]; Lu Yang 等人综合地分析了系统结构参数和摄像机标定参数对于双目视觉系统定位精度的影响^[7]; 毕超等人通过公式推导得到了基线间距、相机焦距、物距和像素误差等结构参数与测量误差的表达式,并且分析了这些参数与测量误差的关系和影响^[8]; 国外也有学者对此展开研究, Fahimeh Fooladgar 等人通过仿真分析了基线长度、焦距和像素大小等参数对误差的影响^[9]; Kristiaan Schreve 等人探讨了摄像机各参数的不确定性以及量化不确定性的影响,并提出了精度模型,有利于双目立体相机的结构设计^[10]; Zhang Tao 等人提出了一个更为通用的误差模型,最大限度地减少重建误差,提高了双目系统的测量精度^[11]; Stefan Wenhardt 等人建立了立体相机系统的参数与给定曲面三维重建误差之间的数学关系^[12]。

这些研究主要是根据双目立体视觉系统的数学模型从理论和仿真上来分析各种参数对测量误差的影响,并没有从真正意义上仿真实双目成像的过程。由于透镜的尺寸一方面直接影响着成像分辨率,另一方面又影响着系统的结构和景深。因此根据应用需要,兼顾系统结构、成像分辨率以及系统的景深合理选择成像系统的接收口径尺寸至关重要^[13]。

本文首先利用非相干成像的理论对双目视觉的成像过程进行了仿真和实验;其次通过加速鲁棒特征(SURF)算法来提取所采集的左右图像的特征点,并且对其进行特征点匹配,从而获取匹配点的坐标值,进而计算出左右两幅图像的视差均方根误差来表征系统的测量误差;最后通过改变透镜孔径大小在不同匹配点数目条件下得出了透镜孔径与系统的测量误差之间的关系。

1 研究方法

1.1 非相干成像

假如 1 个物函数为 $U_0(x_0, y_0)$, 当用非相干光对物面进行照明时,物面上任意点发出的脉冲,即点扩散函数都非相干,在像面上相对应的脉冲响应非相干叠加,也就是强度叠加。非相干成像系统是关于强度的线性系统。其物像关系满足以下卷积积分^[14]

$$I_i(x_i, y_i) = C \int \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\hat{x}_0, \hat{y}_0) h_i(x_i - \hat{x}_0, y_i - \hat{y}_0) d\hat{x}_0 d\hat{y}_0 = C I_0(x_i, y_i) * h_i(x_i, y_i) \quad (1)$$

式中: C 是常数, I_0 是物的强度分布, I_i 是像强度分布, h_i 是强度点扩散函数。物像之间的关系在频域中可以表示为^[15]

$$G_i(\alpha, \beta) = G_0(\alpha, \beta) H_1(\alpha, \beta) \quad (2)$$

式中: $G_0(\alpha, \beta)$, $G_i(\alpha, \beta)$, $H_1(\alpha, \beta)$ 分别是 $I_0(x_i, y_i)$, $I_i(x_i, y_i)$, $h_i(x_i, y_i)$ 的傅里叶变换。

实际应用中在意的是携带信息的那部分光强与零频分量的比值,即 $G_0(\alpha, \beta)$, $G_i(\alpha, \beta)$ 和 $H_1(\alpha, \beta)$ 分别与零频分量的比值,引入归一化频谱,由式(2)可得

$$Y_i(\alpha, \beta) = Y_0(\alpha, \beta) H_1(\alpha, \beta) \quad (3)$$

$H_1(\alpha, \beta)$ 定义为非相干成像系统的光学传递函数^[16](OTF), 它可以用来评价非相干成像系统在频域中的效应。

1.2 SURF 算法的原理

特征点的提取与匹配对于获取准确的视差值具有很大的影响,这不仅与所获得的图像有关,还与所采用的匹配算法有关。目前比较常用的方法主要有尺度不变特征(SIFT)算法^[17], SURF 算法^[18]和快速特征点提取和描述(ORB)算法^[19], 由于 SURF 算法旋转鲁棒性、模糊鲁棒性、尺度变换鲁棒性都比其他两种算法要好,而计算速度仅次于 ORB 算法^[20]。因此,本文采用是 Herbert Bay 提出的 SURF 算法。其基本原理可以分为以下几个步骤。

(1) 构建 Hessian 矩阵^[21]。其目的是为了生成图像的特征点,为后续的特征提取做准备。对于图像 $I(x, y)$, 其 Hessian 矩阵

$$\mathbf{H}(I(x, y)) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

它的判别式为

$$\text{Det}(\mathbf{H}) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \quad (5)$$

首先需要对图像进行高斯滤波再建立 Hessian 矩阵, 其表达式如下

$$\mathbf{H}(x, y, \sigma) = \begin{pmatrix} L_{xx}(x, y, \sigma) & L_{xy}(x, y, \sigma) \\ L_{xy}(x, y, \sigma) & L_{yy}(x, y, \sigma) \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: (x, y) 为图像的像素坐标, $L(x, y, \sigma) = G(\sigma)I(x, y)$ 表示图像的高斯尺度空间, 是通过不同的高斯核与图像卷积获得的。

利用这种方法可以计算出图像中每个像素的 \mathbf{H} 行列式的判定值, 通过该值来判定图像 $I(x, y)$ 中的特征点。 $\text{Det}(\mathbf{H})$ 中的 $L(x, y)$ 是初始图像的高斯卷积, 因为高斯核服从正态分布, 系数由中心点向外逐渐减小, 为了加快运算速度, SURF 算法用方块滤波器代替了高斯滤波器 L , 所以需要给 L_{xy} 赋予一个权重系数 0.9, 这样才能抵消方块滤波器所带来的误差, 可得 Hessian 矩阵的判别式

$$\text{Det}(\mathbf{H}) = L_{xx}L_{yy} - (0.9L_{xy})^2 \quad (7)$$

(2) 构造尺度空间^[22]。在 SURF 算法中, 不同组之间的图像大小都相同, 不同组之间所用的方块滤波器的模板尺寸会逐渐变大, 同一组不同层图像所用的滤波器的大小一样, 但是滤波器的尺度空间因子逐渐变大。

(3) 特征点定位^[23]。SURF 算法将经过 Hessian 矩阵处理后的每个像素与图像域和尺度域的全部相邻点进行比较, 只要该点大于或者小于所有邻域点, 则确定其为特征点。

(4) 确定特征点方向^[23]。采用了 Harr 小波特征, 在一个圆形邻域内, 统计在 60° 扇形区域内特征点在水平方向和垂直方向的 Harr 小波特征总和, 然后以 0.2 rad 的间隔旋转扇形, 并且再统计其 Harr 小波特征值, 最后将最大值的扇形方向确定为该特征点的主方向。

(5) 生成特征描述子^[24]。提取特征点范围内 4×4 的区域, 其方向沿着特征点的主方向。在每一个子区域内统计 25 个像素点在水平和垂直方向的 Harr 小波特征, 其具有 4 个方向的特征, 分别为垂直方向值之和, 水平方向值之和, 垂直方向绝对值之和以及水平方向绝对值之和。因此一共有 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 维的特征描述子。

(6) 特征点匹配。通过 2 个特征点之间的欧氏距离来确定其匹配度, 距离越近则其匹配度越好。除此之外, 还需要通过 Hessian 矩阵的迹剔除误匹配点, 如果 2 个特征点的 Hessian 矩阵迹具有相同的正负号, 则不需要剔除, 否则即使欧氏距离为零, 也要剔除。

1.3 计算视差均方根误差

双目成像模型如图 1 所示, P 为空间中的一点, P_L 和 P_R 分别为点 P 在左右像平面上的像点, f 是焦距, O_L 和 O_R 是左右相机的光心, b 为光心之间的距离(基线), x_L 和 x_R 分别为像点 P_L 和 P_R 到成像面最左边缘的距离, 其视差公式^[25]为

$$\text{disparity} = x_L - x_R \quad (8)$$

根据均方根误差的公式可得计算视差均方根误差的公式为

$$\text{RMSE}_{\text{disparity}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_{\text{obs},i} - d_{\text{true},i})^2} \quad (9)$$

式中: N 为测试的次数, $d_{\text{obs},i}$ 为视差的测试值, $d_{\text{true},i}$ 为视差的真值。通过计算每一张图像对的视差均方根误差来表征系统误差。

2 计算机模拟

首先在计算机上模拟非相干双目成像过程; 然后采用 SURF 算法对所获得的左右图像对进行特征提取与匹配, 进而计算出左右图像对的视差值; 最后求得视差均方根误差来表征系统误差, 分析透镜孔径大小与系统误差之间的关系。本文的仿真流程如图 2 所示。

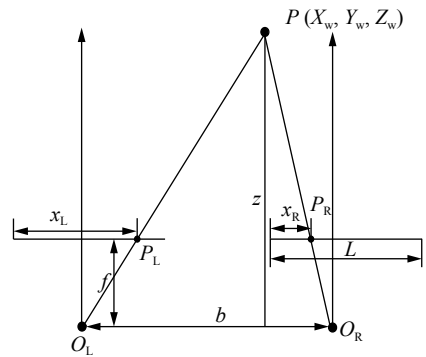


Fig. 1 Binocular imaging model

图 1 双目成像模型

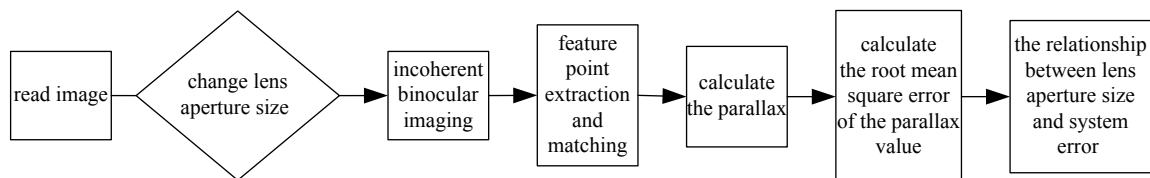


Fig. 2 Simulation flow chart

图2 仿真流程图

2.1 双目成像过程

分辨率板分别在左右2个相机上成像,共125组图像对,仿真所采用的物体为美国空军分辨率板,设该分辨率板的几何尺寸 L_0 为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,如图3所示。仿真时所设置的相关参数:波长 $\lambda=600\text{ nm}$,透镜焦距 $f=30\text{ mm}$,透镜的孔径 $D=0.2\sim 28\text{ mm}$ 。仿真时物体的采样点数目为 512×512 像素。

在非相干照明下,双目成像的主要流程如图4所示。

2.2 特征点提取及匹配

由于匹配点数目达到一定的数值后,匹配点的数目对系统误差的影响不大,并且为了能够满足在一定的孔径范围内匹配到相同数量的匹配点数目,其设定不能超过最小孔径所能匹配到的匹配点数目。只有这样才能排除匹配点数目对于系统误差的影响,保证了单一变量——孔径尺寸对系统误差的影响,因此将匹配点的数目设为25个、40个、55个、70个。

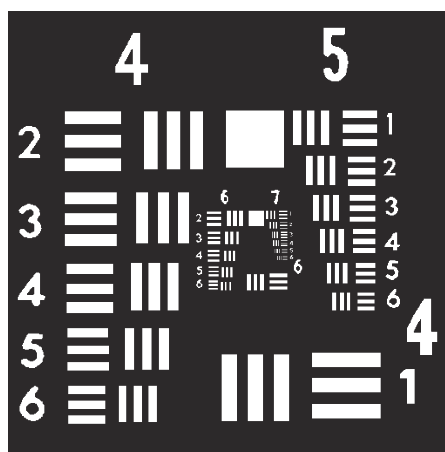


Fig. 3 United States Air Force resolution board

图3 美国空军分辨率板

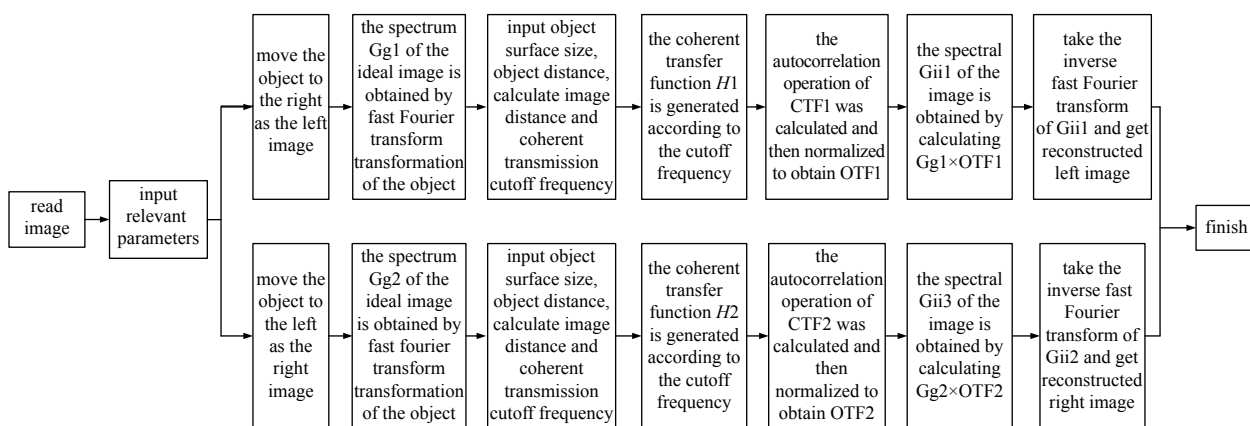


Fig. 4 Binocular imaging simulation flow chart

图4 双目成像仿真流程图

分别在设定的匹配点数目条件下采用SURF算法对双目成像仿真过程中所得到的分辨率板图像进行特征点提取与匹配,获取匹配点对的坐标,并且根据式(8)计算出匹配点的视差,根据式(9)计算出视差的均方根误差来表征系统误差。

2.3 分析仿真结果

通过计算机仿真实验,我们一共得到了4组实验数据,为了更加直观地表示透镜孔径大小与系统误差之间的关系,采用多项式拟合法将所得到的数据进行曲线拟合如图5所示,图中每条曲线分别表示在不同匹配点数目的条件下拟合的结果。

由图5(a)可以看出,当匹配点的数目保持不变,即匹配点数目为25个时,随着透镜孔径的增大,系统误差持续减少,并且当透镜孔径增大到达到一定的数值时,系统误差趋近于0。图5(b)、图5(c)、图5(d)分别是在匹配点数目为40个、55个、70个的条件下透镜孔径大小与系统误差之间的关系,得到的结果与图5(a)的仿真结果一致。此外,从这4组实验数据中,我们还可以看出,当匹配点的数目增加时,系统误差的变化趋势基本保持一致。

为了保证仿真实验的准确性,本文还增加了2组仿真实验,所采用的输入图像如图6所示。

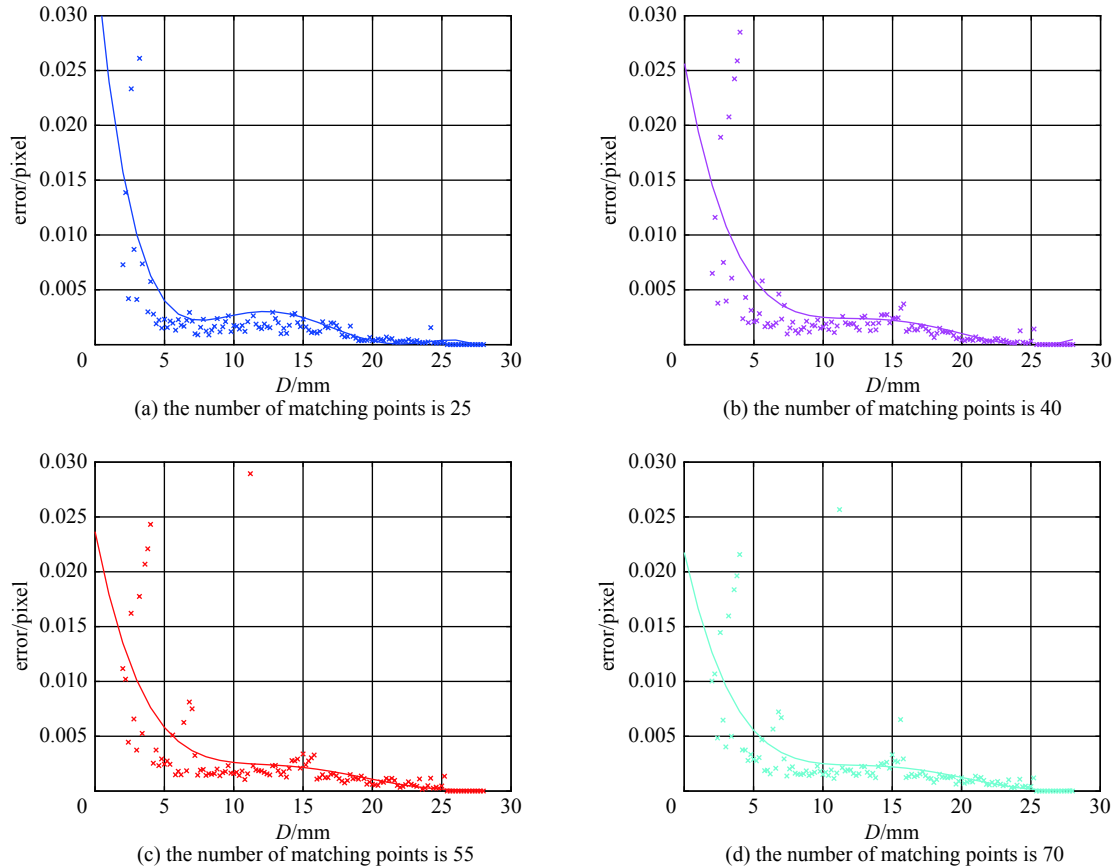


Fig. 5 Resolution board: the relationship between lens aperture size and system error

图 5 分辨率板:透镜孔径大小与系统误差之间的关系

分别对这 2 张图像进行同样的处理,最后分别得到了这 2 组仿真实验在不同匹配点数目条件下透镜孔径大小与系统误差之间的关系如图 7、图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以看出,当改变作为物的输入图像时,其仿真的结果与图 5 的仿真结果基本一致。

由这 3 组的仿真结果可以看出,对于输入的任何图像来说,在不同匹配点的条件下,随着透镜孔径的增大,系统误差持续减少,并且当透镜孔径增大到一定的数值时,系统误差趋近于 0。因此,在设计双目视觉系统时,通过选取合适的透镜孔径大小,提高双目视觉系统的测量精度。

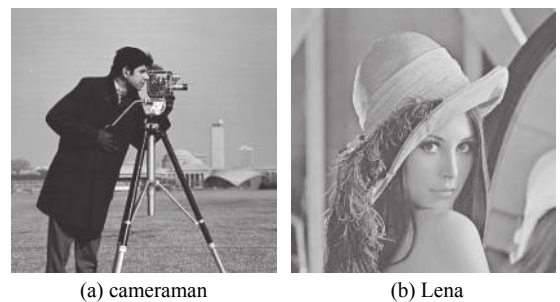


Fig. 6 Two images added as objects

图 6 新增 2 张作为物的图像

3 实验验证及分析

3.1 实验设置

本文所需要的实验仪器主要包括数字工业相机、双胶合消色差透镜、电动光阑、电控平移台、二维组合平移台、分辨率测试靶、XY 移动安装座、背光照明光源、激光器等。搭建好的实验平台如图 9 所示,实验仪器的相关参数如表 1 所示。

3.2 实验方案与方法

为了验证透镜孔径大小与系统误差之间的关系,需要固定视差值和物距。实验中通过电控平移台将分辨率测试靶分别向左向右平移,使其距离保持在 1.16 mm,并结合光学倍率即可求出视差的真实值为 80 个像素值;分辨率测试靶离透镜的距离固定为 300 mm。通过调节电动光阑的大小来限制参与成像的光束,其作用相当于改变了透镜的孔径大小,电动光阑的大小以间隔 1 mm 在 5~26 mm 范围内取值,当采集完所有图像后,将实验分为 4 组,分别在匹配点数目为 25 个、40 个、55 个、70 个的条件下进行特征点提取和匹配并计算每组图像中匹配点

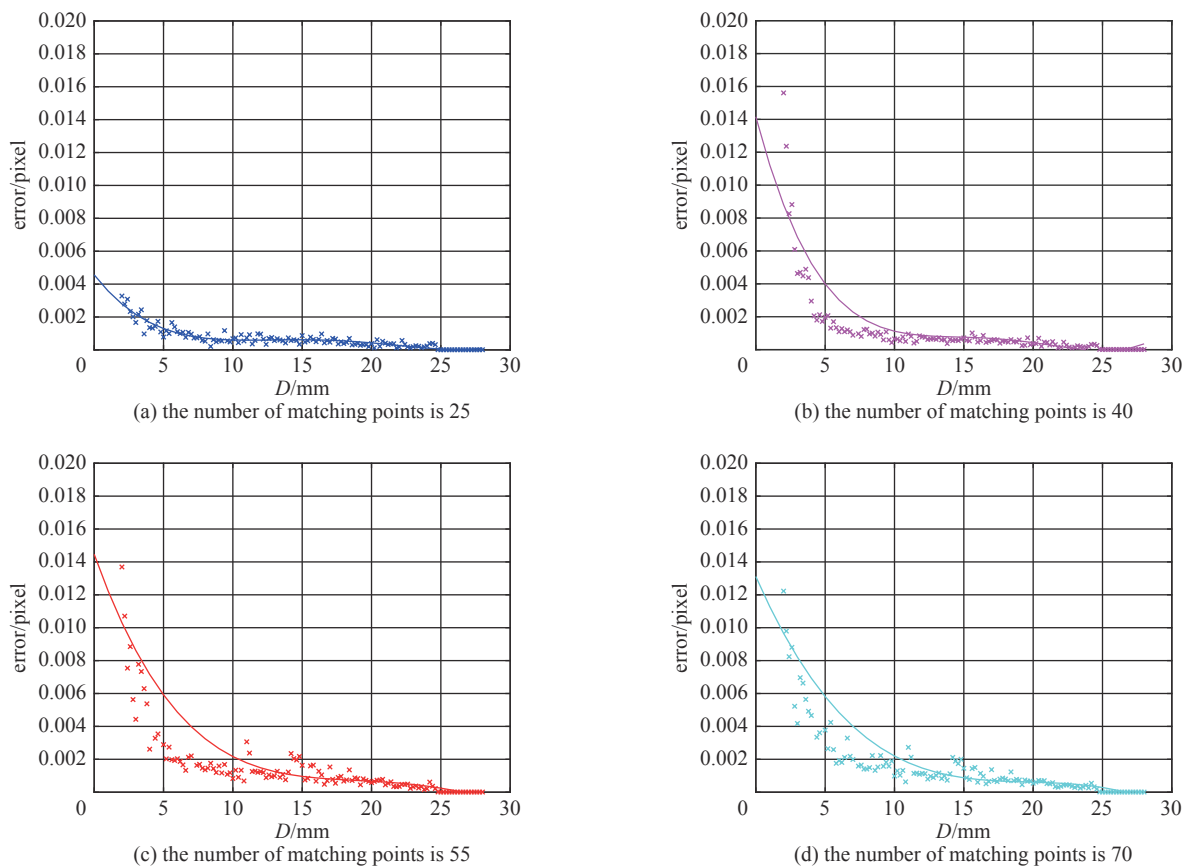


Fig. 7 Relationship between lens aperture size and system error using “Cameraman” as input

图 7 Cameraman: 透镜孔径大小与系统误差之间的关系

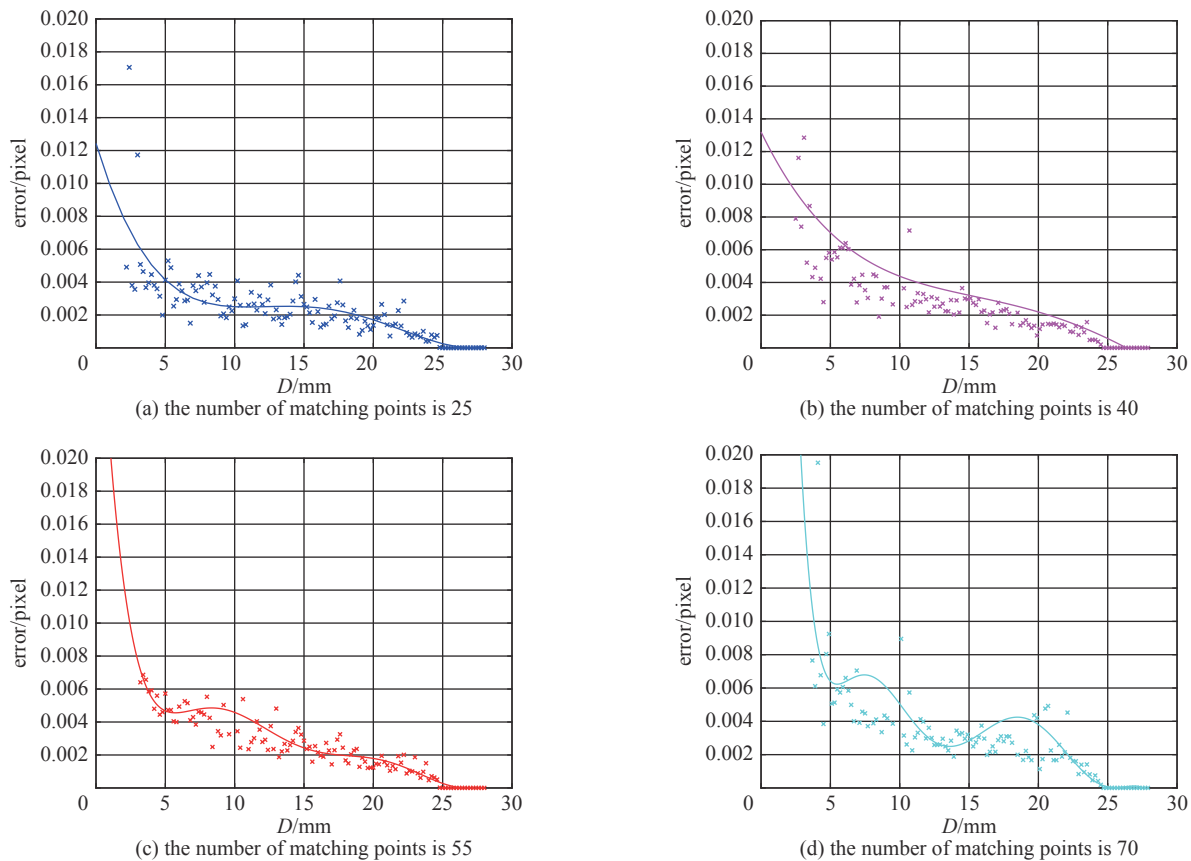


Fig. 8 Relationship between lens aperture size and system error using “Lena” as input

图 8 Lena: 透镜孔径大小与系统误差之间的关系

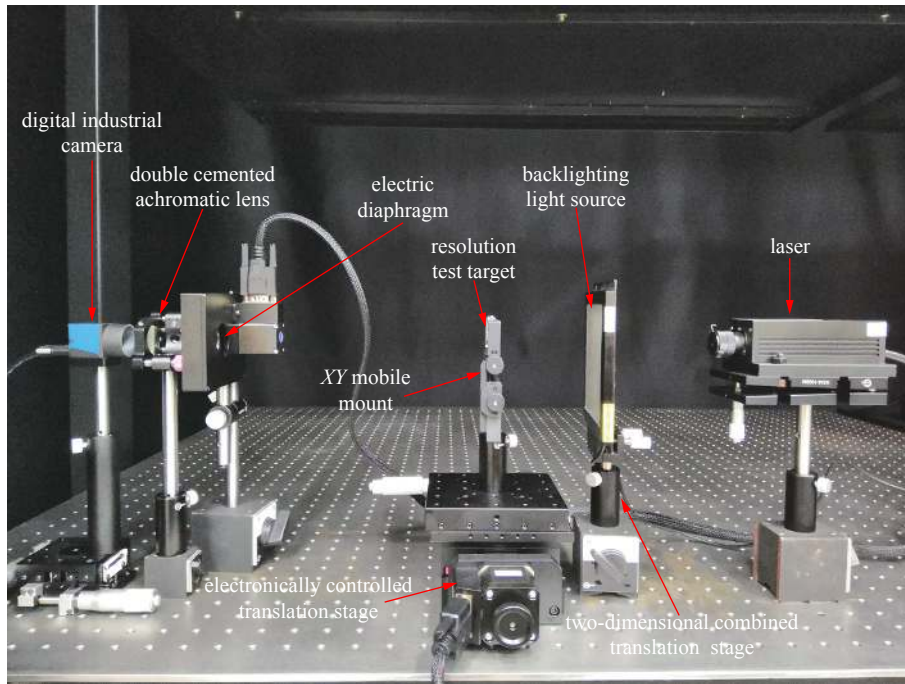


Fig. 9 Established experimental platform

图 9 已搭建好的实验平台

表 1 实验仪器的相关参数

Table 1 Relevant parameters of the experimental instrument

laboratory apparatus	parameter values
digital industrial camera	resolution: 3840×2748; pixel size: 1.67 μm×1.67 μm
double cemented achromatic lens	diameter: φ25.4 mm; focal length: 30 mm
electric diaphragm	diameter range: φ2.5~28 mm
electronically controlled translation stage	moving direction: x; reading accuracy: 0.001 mm
two-dimensional combined translation stage	moving direction: x-y; reading accuracy: 0.001 mm
XY mobile mount	horizontal stroke: 50 mm; vertical stroke: 30 mm
resolution test target	size: 76.2 mm×25.4 mm
backlighting light source	power: 25 W; light source color: red
laser	wavelength: 532 nm; power: 50 mW

的视差值,由于孔径尺寸会影响成像分辨率,导致 SURF 算法在进行特征点提取时产生偏差,计算出来的视差值为视差测试值,最后得出每组图像的视差均方根误差来表征系统误差,以此来分析透镜孔径大小与系统误差之间的关系。

具体的实验步骤为:

- (1)搭建实验平台。
- (2)调节电动光阑的大小,即改变透镜孔径的大小。
- (3)将分辨率测试靶平移至视野中间的位置,然后将其向左移动 0.58 mm,由工业相机采集左图。
- (4)然后再将分辨率测试靶向右移动 1.16 mm,同样由工业相机采集右图。
- (5)重复步骤 2,3,4,分别调节电动光阑的大小为 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 mm,分别采集左右图像共 22 组,直至采集完所有图像后才进入下一步。
- (6)对每一组图像分别提取特征点,提取的特征点数目分别设置为 25, 40, 55, 70 个,并对所提取到的特征点进行匹配。
- (7)计算每一组图像在不同匹配点数目下的视差值以及视差均方根误差来表征系统误差。
- (8)分析透镜孔径大小与系统误差之间的关系。

其实验流程如图 10 所示。

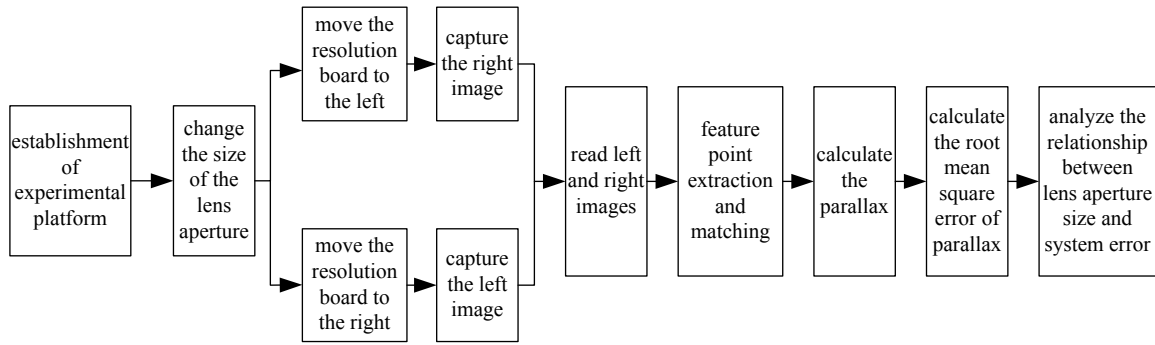


Fig. 10 Flow chart of experiment

图 10 实验流程图

3.3 实验结果与分析

根据实验方案,结合计算机仿真结果进行实验,在不同匹配点数目的条件下一共得到了 4 组实验数据,为了更加直观地表示透镜孔径大小与系统误差之间的关系,同样采用了多项式拟合法将所得到的数据进行曲线拟合如图 11 所示。

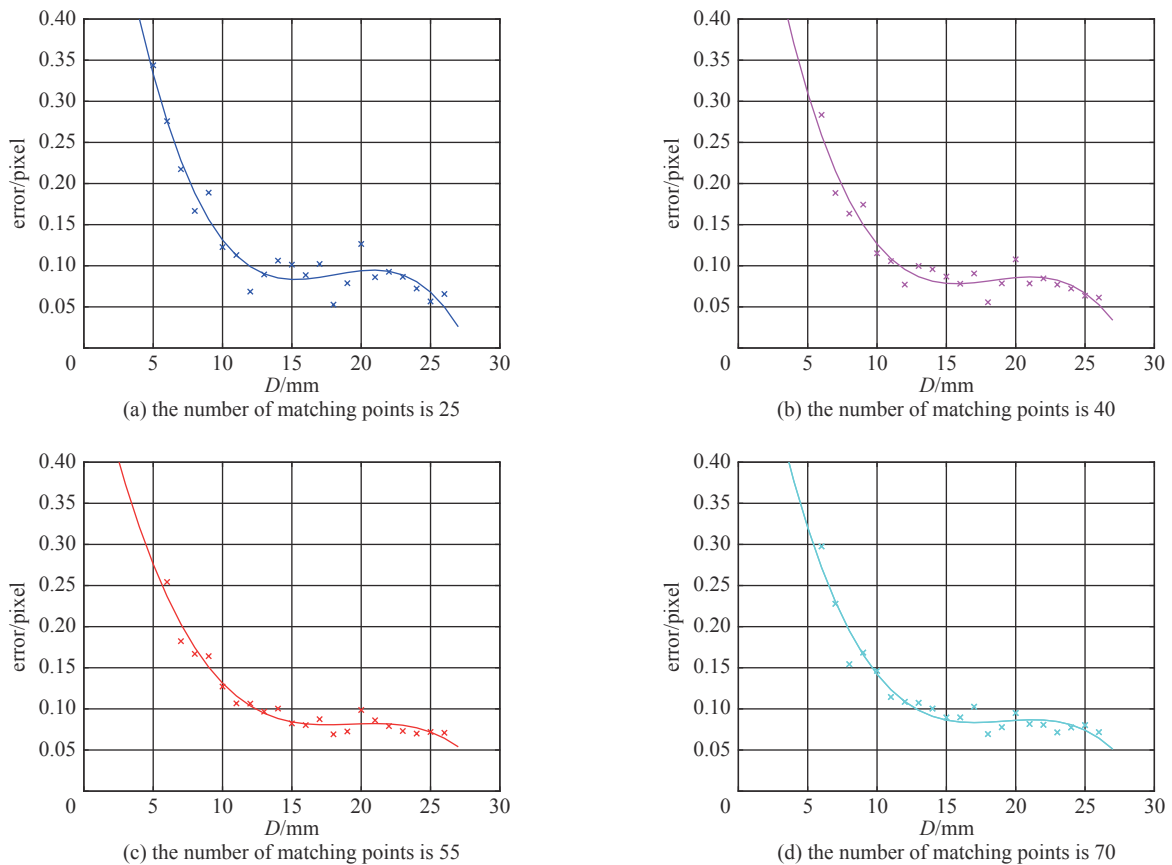


Fig. 11 Experimental relationship between lens aperture size and system error

图 11 透镜孔径大小与系统误差之间的关系

与仿真实验结果基本一致,验证了仿真结果的准确性。由于在实验过程当中存在多种外在因素的干扰,因此不可避免地会引入各种误差,导致所获得的个别数据并不能够集中分布在拟合曲线的两侧,并且即使当透镜的孔径大小达到一定的数值时,其系统误差不能够像仿真结果一样近似于 0,而是趋于一个较小的值。

4 结 论

本文介绍了非相干双目成像、SURF 算法和计算视差的原理,利用非相干成像理论仿真双目成像的过程,分析讨论了 3 组图像在不同匹配点下透镜孔径大小与系统误差之间的关系,通过实验验证了仿真结果的准确性,扩充了本领域的研究。最后得出结论:对于输入的任何图像来说,在不同匹配点数目的条件下,随着透镜孔径大小的增

大, 双目视觉测量系统误差减小, 并且当透镜孔径大小取值为 13 mm 时, 系统误差趋近于 0。在其他的 research 工作中, 许多工作都是致力于提高算法的提取和匹配的效果, 而没有考虑到输入图像所携带信息的情况, 如果采集的图像质量不好, 即使算法的准确性和鲁棒性好, 最终匹配效果也不够理想。而本文研究的是透镜孔径大小与系统误差之间的关系, 这将为双目系统设计过程中孔径尺寸的选取提供理论和实验依据, 进而使得立体匹配的效果达到最好。更进一步说, 这将有损于双目视觉后续的一些工作的开展, 如机器人导航、精密工业测量、物体识别、虚拟现实、场景重建等。

参考文献:

- [1] Liu Qiong, Qin Xiansheng, Yin Shenshun, et al. Structural parameters optimal design and accuracy analysis for binocular vision measure system[C]//Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2008: 156-161.
- [2] Fan Xinfeng, Cheng Yuanzeng, Fu Qiang. Accuracy analysis and structure configuration of binocular vision system[C]//Proceedings of the 2015 3rd International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications. 2015: 1427-1431.
- [3] 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. (Min Xinli, Wan De'an, Zhang Jian. Theoretical study on setting structural parameters of CCD binocular vision measurement system[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2001(3): 54-56)
- [4] 赵萍, 李永奎, 田素博, 等. 双目视觉测量系统结构参数理论与试验研究[J]. *机械设计*, 2013, 30(2): 64-68. (Zhao Ping, Li Yongkui, Tian Subo, et al. Theoretical and experimental research on structural parameters of binocular vision measuring system[J]. *Journal of Machine Design*, 2013, 30(2): 64-68)
- [5] 肖志涛, 张文寅, 耿磊, 等. 双目视觉系统测量精度分析[J]. *光电工程*, 2014, 41(2): 6-11. (Xiao Zhitao, Zhang Wenyin, Geng Lei, et al. Accuracy analysis of binocular vision system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(2): 6-11)
- [6] Yu Huan, Xing Tingwen, Jia Xin. The analysis of measurement accuracy of the parallel binocular stereo vision system[C]//Proceedings of SPIE, 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test, Measurement Technology, and Equipment. 2016: 96841L.
- [7] Yang Lu, Wang Baoqing, Zhang Ronghui, et al. Analysis on location accuracy for the binocular stereo vision system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10: 7800316.
- [8] 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 Chao, Hao Xue, E Malan, et al. Accuracy analysis of binocular vision system based on the measuring error model[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2020, 56(2): 1-4,30)
- [9] Fooladgar F, Samavi S, Sorousmehr S M R, et al. Geometrical analysis of localization error in stereo vision systems[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(11): 4236-4246.
- [10] Schreive K. How accurate can a stereovision measurement be?[C]//15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM). 2014: 1-7.
- [11] Zhang T, Boulton T. Realistic stereo error models and finite optimal stereo baselines[C]//2011 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV). 2011: 426-433.
- [12] Wenhardt S, Denzler J, Niemann H. On minimizing errors in 3D reconstruction for stereo camera systems[J]. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2007, 17(2): 337-348.
- [13] 闫锋涛, 范斌, 侯溪, 等. 稀疏子孔径采样检测大口径光学器件[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12): 3193-3196. (Yan Fengtao, Fan Bin, Hou Xi, et al. Large-aperture mirror test using sparse sub-aperture sampling[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3193-3196)
- [14] 钱晓凡. 信息光学数字实验室(Matlab版)[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 47-55 (Qian Xiaofan. Information optics digital laboratory (Matlab)[M]. Beijing: Science Press, 2015: 47-55)
- [15] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2015: 457-459 (Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2015: 457-459)
- [16] 苏显渝. 信息光学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011: 63-66 (Su Xianyu. Information optics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011: 63-66)
- [17] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [18] Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L. SURF: speeded up robust features[J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 2006, 110(3): 404-417.
- [19] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]//2011 International Conference on Computer Vision. 2011: 2564-2571.
- [20] Karami E, Prasads S, Shehata M. Image matching using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: performance comparison for distorted images[C]//2015 Newfoundland Electrical and Computer Engineering Conference. 2015: 1710-1714.
- [21] Wang Wei, Li Wenhui, Wang Chengxi, et al. A novel watermarking algorithm based on SURF and SVD[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 303/306: 2117-2121.
- [22] 李建军, 史春梅, 单琪凯, 等. 基于SURF算法的大豆灰斑病视觉识别系统[J]. *大豆科学*, 2019, 38(1): 90-96. (Li Jianjun, Shi Chunmei, Shan Qikai, et al. Visual identification system of soybean frogeye leaf spot based on SURF feature extraction[J]. *Soybean Science*, 2019, 38(1): 90-96)
- [23] 徐明, 刁燕. 基于SURF算子与FLANN搜索的图像匹配方法研究[J]. *现代计算机*, 2020(14): 49-52,57. (Xu Ming, Diao Yan. Image matching method based on SURF Operator and FLANN search[J]. *Modern Computer*, 2020(14): 49-52,57)
- [24] Li Aomei, Jiang Wanli, Yuan Weihua, et al. An improved FAST+SURF fast matching algorithm[C]//7th International Congress of Information and Communication Technology. 2017: 306-312.
- [25] 朱玲莹, 桑庆兵, 顾婷婷. 基于视差信息的无参考立体图像质量评价[J]. *计算机科学*, 2020, 47(9): 150-156. (Zhu Lingying, Sang Qingbing, Gu Tingting. No-reference stereo image quality assessment based on disparity information[J]. *Computer Science*, 2020, 47(9): 150-156)