

成像参数对大深度物体聚焦形貌恢复的影响

夏晓华*, 曹雨松, 向浩鸣, 袁述皓, 葛兆凯

长安大学工程机械学院, 陕西 西安 710064

摘要 为探究成像参数对大深度物体聚焦形貌恢复精度的影响规律,明确实际应用中聚焦形貌恢复重建精度不满足要求时成像系统的改进措施,在构建聚焦形貌恢复三维重建精度评价指标的基础上,利用正交实验确定成像参数对聚焦形貌恢复精度影响的主次顺序,重点分析主要和次主要参数对重建精度的影响规律,并揭示最佳成像参数随多聚焦图像采样间距的变化关系。考虑到成像参数的变化实际通过改变系统景深影响聚焦形貌恢复精度,建立了多聚焦图像采样间距与最佳景深之间的经验公式,为系统成像参数的设定提供了理论依据。实验结果表明:焦距和 F 数是聚焦形貌恢复的主要和次主要影响参数,在给定的多聚焦图像采样间距下存在使重建精度最高的最佳焦距和最佳 F 数,且随着采样间距减小,最佳焦距增大,最佳 F 数减小;多聚焦图像采样间距与最佳景深之间的经验公式拟合准确率为97.28%,验证准确率为94.76%,可用于最佳景深的计算;采用最佳景深能够显著提升聚焦形貌恢复精度,为大深度物体聚焦形貌恢复精度的提升提供了新途径。

关键词 机器视觉; 聚焦形貌恢复; 成像参数; 大深度物体; 重建精度

中图分类号 TP751 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231824

1 引言

聚焦形貌恢复是一种典型的被动式三维重建技术,该技术通过目标物体的多聚焦图像序列恢复三维形貌^[1-2],由美国哥伦比亚大学的Nayar等^[3]提出,因其具有成本低和精度高等优点,被应用于粗糙度测量^[4]、表面形貌测量^[5]等领域。

目前,聚焦形貌恢复采集物体多聚焦图像的方式以移动成像系统或被测物体为主^[6],其移动距离应不小于物体深度范围。该方式适用于dm级及以内的微小物体三维重建,对于大深度物体,因移动距离过大,在实际应用中往往使用移动镜头的方式获取多聚焦图像^[7]。本文主要讨论移动镜头方式的聚焦形貌恢复。

当前关于提升聚焦形貌恢复精度的研究,多采用消除图像抖动噪声、改善聚焦测度函数和评价窗口以及优化数据插值或拟合算法等方式。在消除图像抖动噪声方面:Jang等^[8-9]和Mutahira等^[10]研究了基于卡尔曼滤波的抖动噪声去除方法,卡尔曼滤波时长短且能显著提高聚焦形貌恢复精度;Mutahira等^[11]创造性地提出利用递归最小二乘法滤除抖动噪声以提高重建精度。在改善聚焦测度函数和评价窗口方面:PERTZ等^[12]对经典的聚焦测度函数进行归纳总结,并在同一

评价指标下分析各聚焦测度函数对聚焦形貌恢复精度的影响;Xia等^[13]提出联合信息熵与Tenengrad的聚焦测度函数,其抗噪能力更强;王秀峰等^[14]提出联合频域离散余弦变换与空域拉普拉斯算子的聚焦测度函数,该函数曲线在峰值附近具有较高的灵敏度,对聚焦图像的评价效果更准确;Muhammad等^[15]认为固定式窗口尺寸与成像设备参数有关,对于确定的成像参数存在最佳窗口尺寸,使用最佳窗口进行清晰度评价能够提升聚焦形貌恢复精度;Lee等^[16-17]使用自适应窗口计算各像素清晰度值,相比于固定式,自适应窗口能够改善聚焦形貌恢复精度,但计算量增加。在优化数据插值或拟合算法方面:Thelen等^[18]将聚焦形貌恢复应用于人脸三维重建时,对插值法和拟合法进行了充分研究,结果表明,插值法计算量小,运算速度快,而拟合法在噪声环境下的重建精度高于插值法,但计算量更大,计算时间更长;Gladines等^[19]提出一种基于相位相关的算法,相比于传统的插值法,该算法的精度及抗噪性均有所增强,但计算量增大;Fu等^[7]利用聚焦测度函数的曲线梯度寻找深度信息,与高斯插值法和多项式拟合法相比,该方法对重建结果的准确率得到提高;Lee等^[20]通过对多聚焦图像序列清晰度数集进行多项式回归分析得到场景深度,该方法比插值法具有更高的精

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2024-01-18; 录用日期: 2024-01-25; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61901056)、秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2022-352)、陕西省交通运输厅交通科研项目(23-10X)

通信作者: *hxia@chd.edu.cn

度。上述方法都能有效提升聚焦形貌恢复的精度,但未考虑成像参数对重建精度的影响,聚焦形貌恢复的精度有待进一步提升。

为了进一步提升聚焦形貌恢复精度,本文深入探究成像参数对大深度物体聚焦形貌恢复精度的影响,明确重建精度随成像参数的变化规律,以及最佳成像参数与最佳景深随多聚焦图像采样间距的变化关系。在给定采样间距下采集多聚焦图像时,设定最佳成像参数或使用最佳景深能够提升聚焦形貌恢复精度,为聚焦形貌恢复精度的提升提供了新的途径。

2 研究方法

2.1 多聚焦图像采集的方法

多聚焦图像可利用仿真或实际设备采集两种方式得到。本文使用图像离焦仿真技术获取虚拟物体的多聚焦图像。相比于实际设备采集方式,仿真能够准确得到被测物体的深度值,有利于对聚焦形貌恢复结果进行准确评价。

仿真技术的核心是相机模型,本文将经典的几何光学薄透镜模型作为相机模型,根据该模型的几何关系推导出物点散焦时的弥散斑半径 ρ :

$$\rho = \frac{f^2}{2F} \frac{|u - u_x|}{u_x(u - f)}, \quad (1)$$

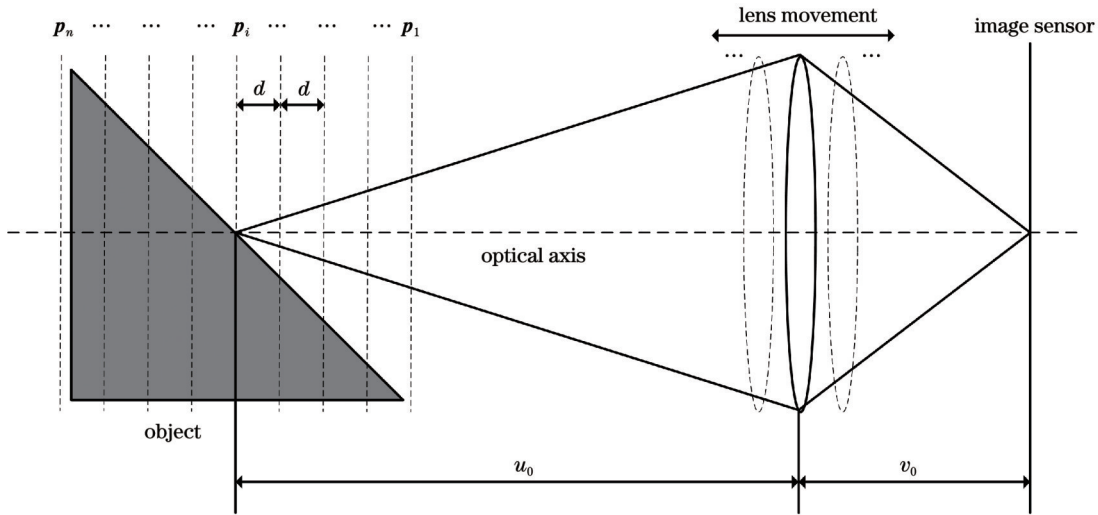


图 1 多聚焦图像采集

Fig. 1 Acquisition of multi-focus images

2.2 深度估计及精度评价的方法

使用聚焦测度函数评价多聚焦图像序列各像素的清晰度。聚焦测度函数根据原理分为灰度函数、信息熵函数、频域函数、统计学函数等^[23-25],其中 Tenengrad 函数是经典的灰度函数之一,常用于聚焦形貌恢复结果评价,因此本文选用 Tenengrad 函数作为聚焦测度函数,其表达式为

$$T_{en} = \sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} [\mathbf{G}_x^2(i, j) + \mathbf{G}_y^2(i, j)], \quad (3)$$

式中: f 表示镜头焦距; F 表示镜头 F 数; u_x 表示物距; u 表示相机聚焦位置。

在弥散斑直径范围内,图像传感器接收的光强呈现中心强、边缘弱的特点,借助二维高斯函数描述这种变化^[21],其表达式为

$$H_{PSF}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (2)$$

式中: (x, y) 为图像传感器平面上以弥散斑中心为坐标原点建立的直角坐标系上某点的坐标; $x^2 + y^2$ 为弥散斑上点 (x, y) 到弥散斑中心的距离平方; 参数 σ_1 为标准差。研究表明, σ_1 与弥散斑半径 ρ 成正比^[21], 即 $\sigma_1 = k\rho$, 比例系数 k 为 $1/\sqrt{2}$ 。

使用点扩散函数结合相机模型构建模糊核^[22], 多聚焦图像可被描述为相应的模糊核与聚焦图像的卷积。如图 1 所示,物点聚焦时满足高斯成像公式 $1/u_o + 1/v_o = 1/f$, 当焦距 f 不变时,借助仿真法改变像距 v_o 来模拟镜头移动,从而聚焦在大深度物体的不同深度位置,且相邻聚焦位置的间距 d 相等,即以等间距聚焦的方式采集目标物体多聚焦图像 $p_i (1 \leq i \leq n)$ 。该方式适用于大深度物体聚焦形貌恢复图像采集,从而使物体各深度位置的重建精度近似保持一致。

式中: T_{en} 为清晰度值; M 和 N 为图像的高度和宽度; \mathbf{G}_x 和 \mathbf{G}_y 分别表示图像水平和垂直方向的灰度梯度,由图像与 Sober 算子卷积得到。本文选用的评价窗口尺寸为 3×3 , 所得评价结果作为该窗口中心像素点的清晰度值。

通过对图像序列中每帧图像相同位置处的清晰度值进行插值或拟合,估计该位置处的深度。一维高斯插值方法具有插值精度高、运算速度快等优点,是聚焦形貌恢复领域常用的插值方法,因此本文选用一维高

斯插值方法估计深度,其表达式为

$$T = T_p \exp \left[-\frac{(Z - Z_p)^2}{2\sigma_z^2} \right], \quad (4)$$

式中: T 、 Z 分别表示第三维度上的清晰度值及对应深度; T_p 为插值得到的曲线尖峰高度; Z_p 为尖峰对应的横坐标; σ_z 为标准差。通过插值得到参数 Z_p 的值,该值即为像素点对应物点的深度值。使用此方法获取目标物体的深度图。

对深度图滤波,有助于滤除错误信息,提高精度。常用的滤波方法有中值滤波、均值滤波等。中值滤波运算简单,能够很好地保护细节信息,对深度图错误信息的滤除效果好^[26],本文选用中值滤波方法,滤波窗口为 3×3 。将滤波后的深度图作为聚焦形貌恢复的最终结果。

在聚焦形貌恢复的相关研究中,均方根误差是一种典型的重建精度评定指标,它可用来衡量预估值与真实值之间的偏差。Pertuz等^[12]在分析聚焦测度函数对聚焦形貌恢复的影响时,使用了该评定指标,并且得到可靠的评价结果。本文使用均方根误差作为精度评

定指标,其表达式为

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{rc} \sum_{(x,y)} |z_c(x,y) - z(x,y)|^2}, \quad (5)$$

式中: r 、 c 表示聚焦形貌恢复得到的预估深度值矩阵的行数和列数; $z_c(x,y)$ 为预估深度值矩阵在 x 行 y 列的元素值; $z(x,y)$ 为虚拟物体的准确深度值矩阵在 x 行 y 列的元素值。

借助 2.1 节和 2.2 节所述的方法能够实现给定目标物体的三维重建及其重建精度分析。对于目标物体的选取,常用的仿真对象有斜面、锥面和半球面。如图 2 所示:斜面能够均匀地分布在空间的不同深度,因此获取的斜面物体在各深度位置的图像像素数量相等,各深度位置的误差对均方根误差评定指标的影响是等价的;锥面和半球面在各深度位置的图像像素数量不相等,均方根误差评定指标受图像像素多的深度位置误差的影响大,不利于三维重建精度的准确评价。因此,选用倾角为 45° 的斜面物体作为实验对象,并以该实验对象在场景中的 $0.5 \sim 1$ m 深度范围为例,探究成像参数变化对大深度物体三维重建精度的影响规律。

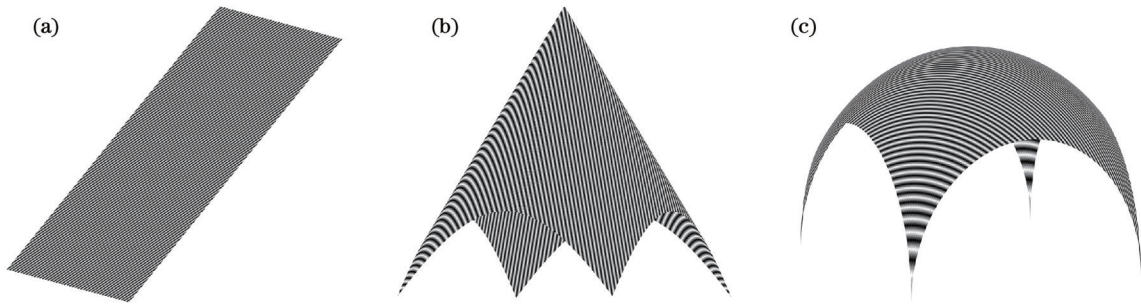


图 2 目标物体。(a)斜面;(b)圆锥成像面;(c)半球成像面

Fig. 2 Aim objects. (a) Inclined plane; (b) conical imaging plane; (c) hemispheric imaging plane

3 实验结果与分析

3.1 成像参数正交实验

成像参数中,焦距、 F 数和像元尺寸是成像系统的重要影响参数,其他参数如镜头畸变可通过相机标定获得^[27],使用先进算法可对其进行较好的校正^[28],因此本文不对可通过相机标定的参数不进行具体分析。为探究焦距、 F 数和像元尺寸对聚焦形貌恢复重建精度的影响程度,通过单指标的等水平正交实验将其划分为主要影响参数、次主要影响参数和非主要影响参数。设置多聚焦图像采样间距为 0.05 m。如表 1 所示,正交实验选用与实际镜头一致的焦距和 F 数,焦距分别为 8 、 12 、 16 mm, F 数分别为 1.4 、 2.0 、 2.8 。相机的像元尺寸是不规则的,一般为 $3 \sim 5$ μm ,为了方便实验数据处理,像元尺寸分别选用 3 、 4 、 5 μm 。此外,为了保证实验的可靠性,用一个空列来表示可能未被分析的参数。各参数之间无交互作用。该实验是一个具有 4 个参数和 3 个水平数的正交实验,选用正交表 $L_9(3^4)$,正

表 1 参数水平表

Table 1 Parameter level table

Number of level	Focal length /mm	F -number	Pixel size / μm
1	8	1.4	3
2	12	2.0	4
3	16	2.8	5

交的表头通过抽签的方式设计,以保证表头中参数排序的随机性。设计的实验表格如表 2 所示,通过均方根误差 E_{rms} 评价三维重建精度。

实验结果分析如表 3 所示,其中: K_i 为表 2 中任一列上水平号为 i ($1 \leq i \leq 3$) 时所对应的实验结果之和; $k_i = K_i/s$, s 为任一列上各水平出现的次数,故 k_i 表示任一列上参数取水平 i 时所得实验结果的算术平均值; R 为 k_i 的极差,极差越大表示参数对实验结果的影响越大。由表 3 可知:焦距对应的极差最大(7.88 mm),为主要影响参数; F 数对应的极差为 3.62 mm,为次主

表 2 实验方案及实验结果
Table 2 Experimental scheme and experimental results

Test number	Focal length	Pixel size	F -number	Blank column	E_{rms} /mm
1	1	1	1	1	7.13
2	1	2	2	2	11.35
3	1	3	3	3	14.28
4	2	1	2	3	3.83
5	2	2	3	2	8.37
6	2	3	1	1	4.86
7	3	1	3	2	2.91
8	3	2	1	3	2.72
9	3	3	2	1	3.48

表 3 实验结果分析
Table 3 Analysis of experimental results

unit: mm

Parameter	Focal length	Pixel size	F -number	Blank column
K_1	32.76	13.87	14.71	15.47
K_2	17.06	22.44	18.66	22.63
K_3	9.11	22.62	25.56	20.83
k_1	10.92	4.62	4.90	5.16
k_2	5.69	7.48	6.22	7.54
k_3	3.04	7.54	8.52	6.94
Range R	7.88	2.92	3.62	2.38

要影响参数;像元尺寸对应的极差为 2.92 mm,小于焦距和 F 数对应的极差,且实际应用中调整焦距和 F 数可以通过调节具有可变光圈的变焦镜头实现,而调节像元尺寸通常需要更换相机,更换相机成本较高,通常不考虑,因此将像元尺寸作为非主要影响参数;空列对应的极差最小(2.38 mm),表示没有未被分析到的重要参数。以下将探究主要和次主要参数即焦距和 F 数对聚焦形貌恢复重建精度的影响规律。

3.2 焦距与 F 数对三维重建精度的影响规律

为探究焦距对三维重建精度的规律,实验设定 F 数为 1.6、像元尺寸为 3 μm ,当多聚焦图像采样间距为 0.075、0.100、0.125 m 时,分别探究重建精度随焦距的

变化规律,如表 4 所示。在给定采样间距下,随着焦距的增大,重建结果的均方根误差 E_{rms} 先减小后增大,存在使重建精度最高的最佳焦距。0.075 m 采样间距对应最佳焦距 15 mm,0.100 m 采样间距对应最佳焦距 14 mm,0.125 m 采样间距对应最佳焦距 13 mm:随着采样间距减小,最佳焦距增大。

为进一步明确规律并确保规律的准确性,设定多聚焦图像的采样间距分别为 0.020、0.025、0.030、0.035、0.040、0.050、0.075、0.100、0.125、0.150、0.200、0.250、0.300 m,通过实验确定各采样间距对应的重建精度最高时的最佳焦距,如图 3 所示。显然,最佳焦距随着采样间距的减小而逐渐增大。

表 4 重建精度随焦距的变化
Table 4 Variation of reconstruction accuracy with focal length

Focal length /mm	E_{rms} in sampling interval of 0.075 m /mm	E_{rms} in sampling interval of 0.100 m /mm	E_{rms} in sampling interval of 0.125 m /mm
12	6.02	10.32	15.30
13	5.90	10.07	15.27
14	5.81	10.06	15.54
15	5.77	10.30	16.31
16	5.84	10.91	17.63

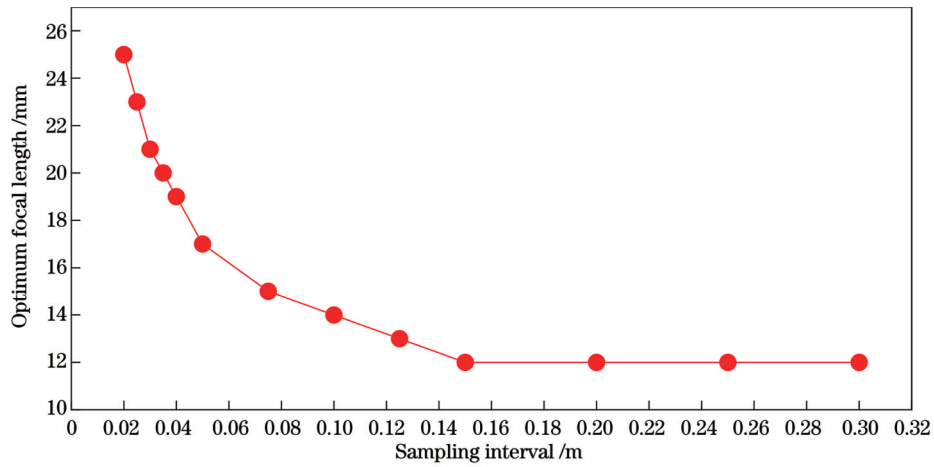


图 3 最佳焦距随采样间距的变化

Fig. 3 Variation of optimum focal length with sampling interval

分析重建精度随 F 数变化规律的实验与上述实验类似, 设定焦距为 12 mm, 像元尺寸为 $3 \mu\text{m}$, 多聚焦图像采样间距分别为 0.100、0.125、0.150 m, 结果如表 5 所示。在给定采样间距下, 随着 F 数的增大, 重建结果的

均方根误差 E_{rms} 先减小后增大, 存在使重建精度最高的最佳 F 数。0.100 m 采样间距对应最佳 F 数 1.2, 0.125 m 采样间距对应最佳 F 数 1.4, 0.150 m 采样间距对应最佳 F 数 1.6; 随着采样间距的减小, 最佳 F 数减小。

表 5 重建精度随 F 数的变化

Table 5 Variation of reconstruction accuracy with F -number

F -number	E_{rms} in sampling interval of 0.100 m / mm	E_{rms} in sampling interval of 0.125 m / mm	E_{rms} in sampling interval of 0.150 m / mm
1.0	10.37	16.52	24.15
1.2	10.04	15.47	22.30
1.4	10.10	15.26	21.75
1.6	10.32	15.30	21.70
2.0	10.64	15.90	22.01

为进一步明确规律, 设定多聚焦图像的采样间距分别为 0.030、0.040、0.050、0.100、0.125、0.150、0.175、0.200 m, 通过实验确定各采样间距对应的

重建精度最高时的最佳 F 数, 如图 4 所示。从图 4 可以看到, 最佳 F 数随采样间距的减小而逐渐减小。

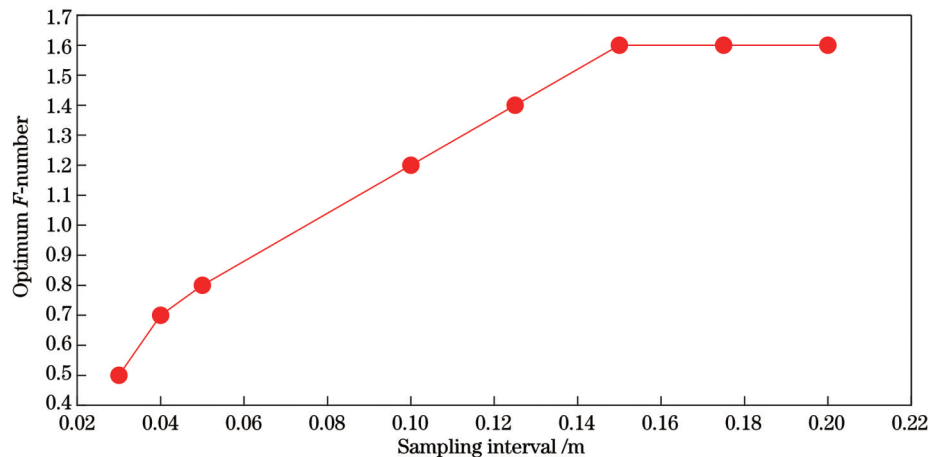


图 4 最佳 F 数随采样间距的变化

Fig. 4 Variation of optimum F -number with sampling interval

3.3 最佳景深随多聚焦图像采样间距的变化关系

通过探究焦距和 F 数对重建精度的影响规律,得知在给定多聚焦图像采样间距下存在使重建精度最高的最佳焦距和最佳 F 数,且随着采样间距减小,最佳焦距增大,最佳 F 数减小。另外,采集多聚焦图像时,成像参数实际通过影响系统景深来影响聚焦形貌恢复精度。因此,有必要通过景深更深入地探究成像参数对聚焦形貌恢复重建精度的影响。

对于大深度物体,需要通过移动镜头的方式采集多聚焦图像,多聚焦图像序列的聚焦位置一般需要覆盖从场景最近距离到最远距离的范围,并留有适当余量。符合这一要求的多聚焦图像采集方案众多,为保证多聚焦图像采集及其景深的确定性,实验规定通过聚焦位置由近及远的方式采集多聚焦图像,并且采集的第二幅图像刚好聚焦在场景中目标物体的最近处。

考虑到随着相机聚焦位置由近及远,多聚焦图像的景深逐渐增大,本实验将最小景深作为系统景深的

评价标准。实验过程中,首先通过各采样间距下给定 F 数的最佳焦距计算最佳景深,对最佳景深及其对应的采样间距进行曲线拟合,得到经验公式;然后,使用各采样间距下给定焦距的最佳 F 数计算最佳景深,通过最佳景深及其对应的采样间距,验证经验公式的可靠性。

为了客观地评估经验公式所得曲线的准确率,借助相对误差来表示点与曲线的接近程度:

$$H = \left(1 - \frac{|R - T|}{T} \right) \times 100\%, \quad (6)$$

式中: H 表示点与曲线的接近度; R 为实际结果; T 为理论结果。

通过三次多项式拟合最佳景深随多聚焦图像采样间距的变化,三次多项式为

$$y = 2553x^3 - 1659x^2 + 277.8x + 2.115, \quad (7)$$

式中: y 为最佳景深; x 为多聚焦图像采样间距。拟合曲线如图 5 所示,使用式(6)对图 5 的拟合点与拟合曲线的接近度进行评估,结果如表 6 所示。可以看到,各

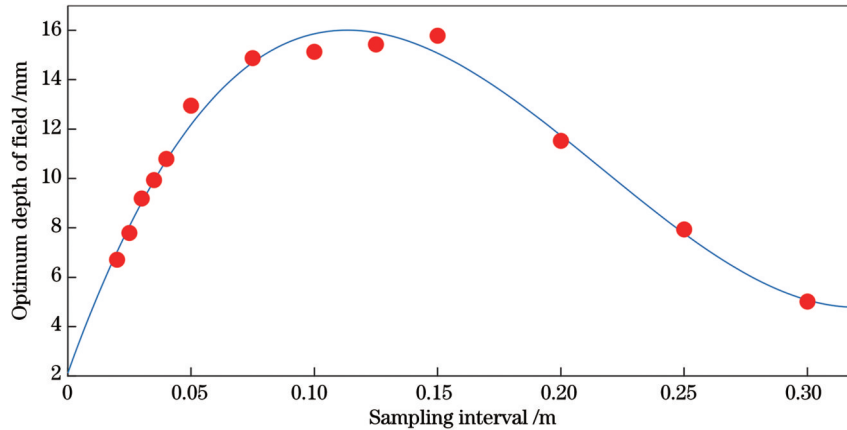


图 5 最佳景深随采样间距变化的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of optimum depth of field varying with sampling interval

表 6 拟合点的接近度

Table 6 Proximity of fitting points

Sampling interval / m	Theoretical result / mm	Actual result / mm	Proximity / %
0.020	7.028	6.710	95.47
0.025	8.063	7.793	96.65
0.030	9.025	9.189	98.19
0.035	9.915	9.934	99.81
0.040	10.736	10.791	99.49
0.050	12.177	12.948	93.67
0.075	14.695	14.874	98.78
0.100	15.858	15.130	95.41
0.125	15.904	15.429	97.01
0.150	15.074	15.781	95.31
0.200	11.739	11.524	98.17
0.250	7.768	7.935	97.85
0.300	5.076	5.014	98.78
Average			97.28

点的接近度均高于 90.00%，最高接近度高达 99.81%，平均接近度高达 97.28%。

将各采样间距下最佳 F 数得到的最佳景深作为验

证数据来验证式(7)的可靠性。验证数据与式(7)曲线如图 6 所示，显而易见，验证数据基本符合曲线的走势。

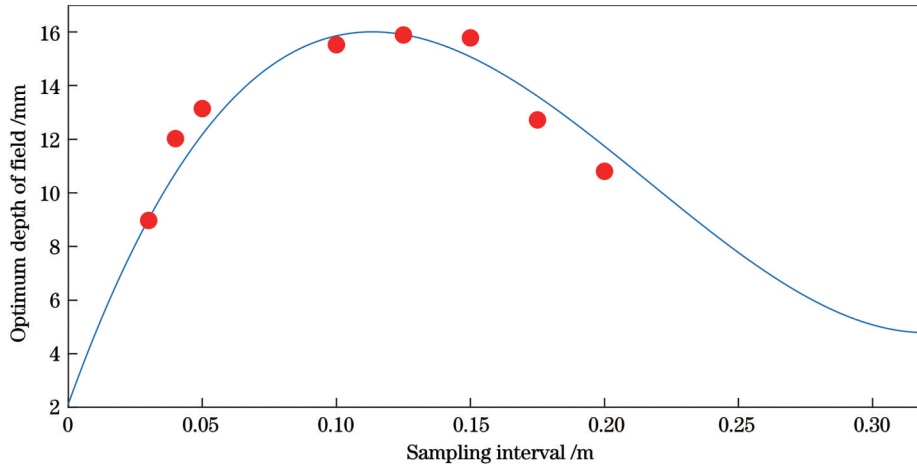


图 6 验证数据与拟合曲线

Fig. 6 Verification data and fitting curve

为了客观地验证式(7)的可靠性,利用式(6)评估各点验证数据与式(7)曲线的接近度。如表 7 所示,各点的接近度均高于 85.00%,最高接近度高达 99.90%,

表 7 验证数据的接近度

Table 7 Proximity of verification data

Sampling interval / m	Theoretical result / mm	Actual result / mm	Proximity / %
0.030	9.025	8.970	99.39
0.040	10.736	12.023	88.01
0.050	12.177	13.143	92.07
0.100	15.858	15.526	97.91
0.125	15.904	15.888	99.90
0.150	15.074	15.781	95.31
0.175	13.606	12.720	93.49
0.200	11.739	10.804	92.03
Average			94.76

表 8 最佳景深重建精度

Table 8 Reconstruction accuracy of optimum depth of field

Sampling interval / m	E_{rms} for optimum depth of field / mm	E_{rms} for large depth of field / mm	E_{rms} for small depth of field / mm
0.035	1.34	2.16	1.85
0.075	5.77	9.12	8.28
0.125	15.26	20.35	19.12

3.5 实际实验验证

为了验证本文方法在实际应用中的有效性,同时考虑到实际场景的真实三维信息难以精确提取的问题,使用斜面物体作为实验对象分别开展最佳景深优化前后的三维重建精度对比实验。实验中,

平均接近度高达 94.76%,证实了式(7)可以用来表示最佳景深随多聚焦图像采样间距的变化规律。

3.4 最佳景深提高聚焦形貌恢复精度

当多聚焦图像采样间距分别为 0.035、0.075、0.125 m 时,对比采用最佳景深与未采用最佳景深的多聚焦图像序列聚焦形貌恢复重建结果的均方根误差 E_{rms} ,以证明通过式(7)得到的最佳景深能够提高聚焦形貌恢复精度。根据式(7)计算得到各采样间距下的最佳景深分别为 9.915、14.695、15.905 mm,实验选择的 大于最佳景深的景深(以下简称“大景深”)分别为 23.894、53.376、74.522 mm,小于最佳景深的景深(以下简称“小景深”)分别为 6.286、8.263、8.920 mm,各景深的重建精度如表 8 所示,小景深和大景深重建结果的均方根误差均大于最佳景深对应的均方根误差。经计算,与未采用最佳景深的聚焦形貌恢复结果相比,采用最佳景深的聚焦形貌恢复方法的三维重建精度提升了 29.67%。由此可见,采用最佳景深能够显著提升聚焦形貌恢复精度。

斜面在相机视野内的深度变化范围为 0.5~0.8 m,相机的分辨率为 1200 pixel×640 pixel,像元尺寸为 5.86 μm 。3 组实验的采样间距分别为 0.06、0.08、0.10 m,调节焦距和 F 数使景深分别达到最佳景深、大景深和小景深,其中最佳景深由式(7)计算得到,

分别为 13.362、15.029、15.858 mm, 大景深分别为 38.655、46.816、42.251 mm, 小景深分别为 9.003、

8.168、7.374 mm, 3 组实验重建精度的对比结果如表 9 所示。

表 9 实际场景最佳景深重建精度

Table 9 Reconstruction accuracy of optimum depth of field in actual scene

Sampling interval / m	E_{rms} for optimum depth of field / mm	E_{rms} for large depth of field / mm	E_{rms} for small depth of field / mm
0.06	7.03	13.42	8.02
0.08	9.72	36.11	12.67
0.10	13.46	35.46	17.62

由表 9 可知, 在给定采样间距下, 小景深和大景深重建结果的均方根误差均大于最佳景深对应的均方根误差。与未采用最佳景深的聚焦形貌恢复结果相比, 采用最佳景深的聚焦形貌恢复方法的三维重建精度平均提升了 40.35%。由此可见, 采用最佳景深能够显著提升实际场景聚焦形貌恢复的精度。

4 结 论

为探究成像参数对大深度物体聚焦形貌恢复精度的影响, 在明确实验方法和误差评定指标的基础上, 通过成像参数正交实验得到焦距和 F 数对重建精度的影响较大, 故着重分析了焦距与 F 数对三维重建精度的影响规律。在给定的多聚焦图像采样间距下, 随着焦距或 F 数的增大, 目标物体重建结果的均方根误差先减小后增大, 存在使重建精度最高的最佳焦距和 F 数, 且随着采样间距的减小, 最佳焦距增大, 最佳 F 数减小。此外, 考虑到成像参数的变化实际通过改变系统景深影响聚焦形貌恢复精度, 实验分析得到最佳景深与多聚焦图像采样间距的经验公式, 使用验证数据得到经验公式的验证准确率为 94.76%, 可用于最佳景深的计算, 采用最佳景深能够实现大深度物体三维重建精度显著提升。

参 考 文 献

- [1] Hou L, Zou J H, Zhang W, et al. An improved shape from focus method for measurement of three-dimensional features of fuel nozzles[J]. *Sensors*, 2022, 23(1): 265.
- [2] 任婧荣, 傅相达, 王孟瑞, 等. 快速宽场三维显微技术研究进展[J]. *中国激光*, 2023, 50(3): 0307104.
Ren J R, Fu X D, Wang M R, et al. Advances in rapid three-dimensional wide field microscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(3): 0307104.
- [3] Nayar S K, Nakagawa Y. Shape from focus[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(8): 824-831.
- [4] Zhang Z Q, Liu F, Zhou Z J, et al. Roughness measurement of leaf surface based on shape from focus[J]. *Plant Methods*, 2021, 17(1): 72.
- [5] Tang J J, Qiu Z J, Li T Y. A novel measurement method and application for grinding wheel surface topography based on shape from focus[J]. *Measurement*, 2019, 133: 495-507.
- [6] Wang Y Z, Jia H R, Jia P X, et al. A novel algorithm for three-dimensional shape reconstruction for microscopic objects based on shape from focus[J]. *Optics and Laser Technology*, 2024, 168: 109931.

- [7] Fu B Y, He R Z, Yuan Y L, et al. Shape from focus using gradient of focus measure curve[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160: 107320.
- [8] Jang H S, Muhammad M S, Yun G, et al. Sampling based on Kalman filter for shape from focus in the presence of noise[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(16): 3276.
- [9] Jang H S, Muhammad M S, Choi T S. Removal of jitter noise in 3D shape recovery from image focus by using Kalman filter[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2018, 81(2): 207-213.
- [10] Mutahira H, Shin V, Muhammad M S, et al. Sampling-noise modeling & removal in shape from focus systems through Kalman filter[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 102520-102541.
- [11] Mutahira H, Shin V, Park U, et al. Jitter noise modeling and its removal using recursive least squares in shape from focus systems[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 14015.
- [12] Pertuz S, Puig D, Garcia M A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus[J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(5): 1415-1432.
- [13] Xia X H, Yin L J, Yao Y S, et al. Combining two focus measures to improve performance[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(10): 105401.
- [14] 王秀峰, 孙小伟, 王加科, 等. 余弦变换与拉普拉斯算子结合的聚焦评价方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(24): 2410005.
Wang X F, Sun X W, Wang J K, et al. Focus measure operator combining cosine transform and Laplacian operator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(24): 2410005.
- [15] Muhammad M S, Mutahira H, Choi K W, et al. Calculating accurate window size for shape-from-focus[C]//2014 International Conference on Information Science & Applications (ICISA), May 6-9, 2014, Seoul, Republic of Korea. New York: IEEE Press, 2014.
- [16] Lee I H, Mahmood M T, Choi T S. Adaptive window selection for 3D shape recovery from image focus[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 21-31.
- [17] Lee I H, Shim S O, Choi T S. Improving focus measurement via variable window shape on surface radiance distribution for 3D shape reconstruction[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(5): 520-526.
- [18] Thelen A, Frey S, Hirsch S, et al. Improvements in shape-from-focus for holographic reconstructions with regard to focus operators, neighborhood-size, and height value interpolation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(1): 151-157.
- [19] Gladines J, Sels S, De Boi I, et al. A phase correlation based peak detection method for accurate shape from focus measurements[J]. *Measurement*, 2023, 213: 112726.
- [20] Lee S G, Lee B G. Three-dimensional shape recovery from image focus using polynomial regression analysis in optical microscopy[J]. *Current Optics and Photonics*, 2020, 4(5): 411-420.
- [21] Subbarao M, Surya G. Depth from defocus: a spatial domain approach[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(3): 271-294.
- [22] Cao Y S, Xia X H, Xiang H M, et al. Simulation of multi-

- focus image acquisition[C]//2022 International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE), November 21–23, 2022, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2022: 277-281.
- [23] 刘济豪, 卢荣胜, 张紫龙, 等. 焦距测量中线纹清晰度评价函数的研究[J]. 光学学报, 2023, 43(9): 0912001.
Liu J H, Lu R S, Zhang Z L, et al. Sharpness evaluation function for line patterns in focal length measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(9): 0912001.
- [24] 殷晨轩, 麻云凤, 程旺, 等. 基于小波变换的光学元件激光损伤三维形貌重构方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 0811032.
Yin C X, Ma Y F, Cheng W, et al. 3D surface reconstruction of laser damage of optical element based on wavelet transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811032.
- [25] 杨海, 冯选璋, 刘家屹, 等. 基于图像评价的显微镜自动对焦方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(4): 0411003.
Yang H, Feng X Z, Liu J Y, et al. Microscope autofocus method based on image evaluation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(4): 0411003.
- [26] Gaganov V, Ignatenko A. Robust shape from focus via Markov Random Fields[C]//19th International Conference on Computer Graphics and Vision (ICCGV), October 5–9, 2009, Moscow, Russia. Moscow: GRAPHICON, 2009: 74-80.
- [27] 赖欣, 杨肖, 张启灿. 基于自适应 EKF 的摄像机标定优化方法[J]. 光学学报, 2023, 43(23): 2315002.
Lai X, Yang X, Zhang Q C. Adaptive EKF-based camera calibration optimization method[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(23): 2315002.
- [28] 孙丽君, 郭强强, 陈天飞. 基于消隐点共线约束的镜头畸变非量测校正方法[J]. 光学学报, 2022, 42(23): 2312004.
Sun L J, Guo Q Q, Chen T F. Nonmetric correction method for lens distortion based on collinear vanishing point constraint[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(23): 2312004.

Influence of Imaging Parameters on Shape from Focus of Large-Depth Objects

Xia Xiaohua*, Cao Yusong, Xiang Haoming, Yuan Shuhao, Ge Zhaokai
School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China

Abstract

Objective Shape from focus is a passive three-dimensional reconstruction technology that restores three-dimensional topography from multi-focused image sequences of target objects. To improve the reconstruction accuracy of this technology in practical applications, the existing methods mostly remove image jitter noise, improve focus measure operator and evaluation window, and optimize data interpolation or fitting algorithms. Although these methods can improve the accuracy of shape from focus, the influence of imaging parameters on reconstruction accuracy is not considered, and the accuracy of shape from focus should be further improved. We explore the influence of imaging parameters on the accuracy of shape from focus of large-depth objects and then clarify the improvement measures of the imaging system when the reconstructive accuracy of shape from focus does not meet the requirements in practical applications. Finally, our study helps select imaging parameters in the application of shape from focus technology to obtain better reconstruction accuracy.

Methods Based on constructing the evaluation index of 3D reconstruction accuracy of shape from focus, we firstly analyze the influence degree of focal length, F -number, pixel size, and other parameters in the imaging system on the accuracy of shape from focus by the equal-level orthogonal experiment of a single index. Meanwhile, the primary and secondary orders of the influence of these imaging parameters on the accuracy of shape from focus are determined. Then, the influence of main and sub-main imaging parameters on the 3D reconstruction accuracy is analyzed emphatically by experiments, and the relationship between the optimal imaging parameters and the sampling interval of multi-focus images is revealed. Finally, considering that the change of imaging parameters affects the restoration accuracy of shape from focus by changing the depth of field of the system, it is necessary to explore the influence of imaging parameters on the restoration accuracy of shape from focus of large-depth objects via the depth of field. The experiments help establish the empirical formula between the sampling interval of multi-focus images and the optimal depth of field, providing a theoretical basis for setting imaging parameters of the system.

Results and Discussions According to the orthogonal experiment results (Table 3), focal length and F -number are the main and sub-main parameters affecting the accuracy of shape from focus, the influence of pixel size is less than focal length and F -number, and the influence of blank column is the least, which means that there are no important parameters that have not been analyzed. In practical applications, adjusting the focal length and F -number can be realized by adjusting the zoom lens with variable apertures, and meanwhile adjusting the pixel size usually requires replacing the camera, which is costly and usually not considered. Thus, the pixel size is regarded as a non-main influencing parameter. Analyzing the

influence of main and sub-main parameters on the accuracy of shape from focus shows that there is the best focal length (Table 4) and the best F -number (Table 5) for the highest reconstruction accuracy under a given multi-focus image sampling interval, and with the decreasing sampling interval, the best focal length increases (Fig. 3) and the best F -number reduces (Fig. 4). Considering that the change of imaging parameters affects the accuracy of shape from focus by changing the depth of field of the system, we establish an empirical formula between the sampling interval of multi-focus images and the optimal depth of field. The fitting accuracy of the empirical formula is 97.28% (Table 6), and the verification accuracy is 94.76% (Table 7), which can be adopted to calculate the optimal depth of field. The optimal depth of field can significantly improve the accuracy of shape from focus (Table 9), which provides a new way for improving the accuracy of shape from focus of large-depth objects.

Conclusions The primary and secondary orders of the influence of imaging parameters on the accuracy of shape from the focus of large-depth objects are discovered, including focal length, F -number, and pixel size. The influence of main and sub-main imaging parameters, focal length, and F -number is analyzed emphatically. It is known that the root mean square error of object reconstruction results decreases first and then increases with the rising focal length or F -number in a given multi-focus image sampling interval, and there is an optimal focal length and F -number that leads to the highest reconstruction accuracy. With the decreasing sampling interval, the optimal focal length increases and the optimal F -number reduces. We consider that the change of imaging parameters affects the accuracy of shape from focus by changing the depth of field of the system. The experiments indicate that the empirical formula between the optimal depth of field and the sampling interval of multi-focused images is obtained. The accuracy of the empirical formula obtained by the verified data is 94.76%, which can be employed to calculate the optimal depth of field. Our experiments show that adjusting the focal length and F -number of the imaging system according to the optimal depth of field can significantly improve the 3D reconstruction accuracy of large-depth objects.

Key words machine vision; shape from focus; imaging parameter; large-depth object; reconstruction accuracy