

基于单目视觉边缘频谱的散焦图像测距算法研究

介邓飞 王浩 吕惠芳 田波涛 张展翔

An improved algorithm for monocular camera edge spectrum based ranging by defocused images

JIE Deng-fei, WANG Hao, LV Hui-fang, TIAN Bo-tao, ZHANG Zhan-xiang

引用本文:

介邓飞, 王浩, 吕惠芳, 田波涛, 张展翔. 基于单目视觉边缘频谱的散焦图像测距算法研究[J]. *中国光学*, 2023, 16(3): 627-636.

doi: 10.37188/CO.2022-0171

JIE Deng-fei, WANG Hao, LV Hui-fang, TIAN Bo-tao, ZHANG Zhan-xiang. An improved algorithm for monocular camera edge spectrum based ranging by defocused images[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 627-636. doi: 10.37188/CO.2022-0171

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0171>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改进的加速鲁棒特征的目标识别

Object detection based on improved speeded-up robust features

中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 719 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0719>

剪切散斑干涉技术及应用研究进展

Research progress in shearography and its applications

中国光学 (中英文). 2017, 10(3): 300 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0300>

图像增强算法综述

Review of image enhancement algorithms

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 438 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0438>

眼科光学相干层析成像的图像处理方法

Image processing method for ophthalmic optical coherence tomography

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 731 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0731>

动态测量的高光谱图像压缩感知

Hyperspectral image compression sensing based on dynamic measurement

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 550 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0550>

高分辨率遥感图像SIFT和SURF算法匹配性能研究

Research on matching performance of SIFT and SURF algorithms for high resolution remote sensing image

中国光学 (中英文). 2017, 10(3): 331 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0331>

文章编号 2097-1842(2023)03-0627-10

基于单目视觉边缘频谱的散焦图像测距算法研究

介邓飞^{1,2*}, 王浩¹, 吕惠芳¹, 田波涛¹, 张展翔¹

(1. 福建农林大学机电工程学院, 福建福州 350002;

2. 福建省农业信息感知技术重点实验室, 福建福州 350002)

摘要: 为了实现基于单目相机的弱或无表面纹理特征目标精确测距, 提出了一种基于保留边缘频谱信息的改进散焦图像测距算法。通过对比以傅立叶变换和拉普拉斯变换为计算核心的两种经典散焦测距理论, 构建相应的清晰度评价函数, 根据灵敏度更好的频谱清晰度函数选择基于频谱的散焦测距法, 并根据频谱清晰度函数在保留目标边缘信息的基础上选择频域计算范围, 从而进行测距。为验证算法的可行性, 本文采用6组不同的鸭蛋样本, 获取不同光圈、不同距离的散焦图像, 利用该改进算法求解鸭蛋到相机镜头的距离。实验结果表明, 基于边缘频谱保留的散焦图像测距改进算法具有良好的测距效果, 相关系数为0.986, 均方根误差为11.39 mm, 并发现对于斜放拍摄的鸭蛋图像进行图像旋转处理后, 可有效地提升测距能力, 均方根误差从11.39 mm下降至8.76 mm, 平均相对误差从2.85%下降至2.28%, 相关系数提升至0.99。基本满足了弱或无表面纹理特征目标测距的稳定、精度等要求。

关键词: 机器视觉; 散焦测距; 边缘频谱; 图像处理; 弱或无纹理特征

中图分类号: TP39; S24 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0171

An improved algorithm for monocular camera edge spectrum based ranging by defocused images

JIE Deng-fei^{1,2*}, WANG Hao¹, LV Hui-fang¹, TIAN Bo-tao¹, ZHANG Zhan-xiang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Fujian Key Laboratory of Agricultural Information Sensing Technology, Fuzhou 350002, China)

* Corresponding author, E-mail: jiedengfei@163.com

Abstract: In order to achieve accurate target ranging of weak or non surface texture features using a monocular camera, an improved defocused image ranging algorithm based on preserving edge spectral information is presented. By comparing two classical defocal ranging theories with Fourier transform and Laplace transform as the foundational principals of calculation, a corresponding definition evaluation function is constructed. We select the method based on the spectrum definition function with better sensitivity, and select the calculation range of the frequency domain by retaining the information on the target edge. To verify the feasibility,

收稿日期: 2022-07-23; 修订日期: 2022-09-06

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(No. 2020J01577); 福建省农业信息感知技术重点实验室项目(No. 2021ZDSYS0101)

Supported by Fujian Provincial Natural Science Foundation Project (No. 2020J01577); the Fujian Key Laboratory of Agricultural Information Sensing Technology (No. 2021ZDSYS0101)

ity of the algorithm, 6 sets of different duck egg samples are used to obtain scattered focus images of different apertures and distances, and the improved algorithm was used to solve the distance of the duck eggs from the camera lens. The experimental results show that the improved algorithm based on the edge spectrum preservation has a good ranging effect with a correlation coefficient of 0.986 and Root Mean Square Error (RMSE) of 11.39 mm. It is found that the range ability can be effectively improved after the image rotation processing of the duck egg image taken at an oblique angle, with the RMSE is reduced from 11.39 mm to 8.76 mm, the average relative error is reduced from 2.85% to 2.28% and the correlation coefficient reaches 0.99. The proposed algorithm fundamentally meets the requirements of stability and high accuracy in ranging targets with weak or non surface texture features.

Key words: machine vision; defocused image ranging; edge spectrum; image processing; non/weak-texture

1 引言

在机器视觉领域,视觉测距一直是一个受到广泛关注的热点问题,近年来,随着计算机技术和数字图像处理技术的快速发展,视觉测距已经被广泛应用在工业,农业,军事,航空航天等各个领域。常用的测距方法主要有主动测距和被动测距两种,主动测距法主要是通过人为因素对环境进行干预,例如利用探头设备等直接接触的测量法和利用雷达、声纳、结构光等非直接接触的测量法。主动测距法的精确度较高,同时对硬件设施的要求也非常高,由此带来的高成本、大设施对于某些应用场景是非常不适用的。被动测距是利用物体表面反射自然光这一特征对物体进行深度测量,包括单目视觉、双目(多目)视觉、运动三维检测等方法^[1-4]。单目视觉测距分为散焦和聚焦两种,受相机成像原理的约束,单目聚焦测距需要拍摄到完美对焦时的照片,才能测量深度信息,这也给实际运用带来了很多问题。目前,散焦测距法广泛应用于图像深度估计以及三维重建,散焦测距法的主要依据是模糊图像为高斯点扩散函数与清晰图像的卷积这一光学理论,通过求解该点扩散函数的系数,即模糊参数,从而求得物距^[5-6]。经典的散焦测距方法有 Pentland 散焦测距法和 Subbarao 散焦测距法^[7-8]。Subbarao 散焦测距法是 Subbarao 在 Pentland 散焦测距法的基础上提出的一种方法,其将散焦图像进行傅立叶变换后,根据功率谱密度恢复目标深度信息^[9]。随着散焦测距法的不断发展,国内外许多学者对这两种方法进行了进一步的研究与改进,使其适用于不同场景并达到特定目标。Mudenagudi 和 Rajagopa-

lan 提出了融合散焦和目标立体特征进行图像拍摄,并采用模拟退火法提取图像信息的方法,求得目标物距^[10]。王海娟进行了基于多层分析的散焦图像的估计研究^[11]。马艳娥提出基于灰度变换的散焦测距方法对目标尺寸进行测量^[12]。薛松提出基于超像素分割和高斯-柯西混合模型的单幅散焦图像深度恢复方法^[13-14]。韩丽燕提出一种利用边缘扩散函数描述散焦程度的测距算法,利用调制传递函数描述图像的散焦程度,采集被测物的距离信息^[15]。袁红星提出了一种对象引导的单幅散焦图像深度提取方法^[16]。上述研究大大促进了自动化、智能化的发展和成熟,具有非常大的意义,但是仍然有未解决的问题。如果物体本身色彩变化不明显,没有清晰的纹理特征,散焦图片各像素点的模糊半径不易区分,通过散焦测距比较困难。

本文以弱表面纹理的鸭蛋为例,提出一种基于边缘频谱信息保留的散焦图像测距改进方法,通过提取仅反映目标边缘的频谱区域用于算法计算,以便能够更加精确地求解目标中心到相机镜头的距离,以避免主动测距方法的成本高、设施大、测距繁琐复杂的缺点,以及被动测距方法中多目视觉与运动三维检测的精度低、不稳定性差等缺点。旨在为目前一般散焦图像测距方法无法实现对弱或无表面纹理对象测距的问题提供方法和参考。

2 材料与方 法

2.1 材料与仪器

实验仪器选用型号为德国 Baumer TXG50c 工业相机,该相机的最大分辨率为 2448×2050,500

万有效像素, CMOS 传感器件, 焦距为 25 mm, 光圈大小为 F1.4-F22、手动可调。

实验材料选用大小、颜色各异的鸭蛋样本、带位置标定的黑色金属板、光学手动升降台、激光测距仪、黑白方格标定板。上述材料的作用如下: 黑色金属板用于鸭蛋位置标定; 手动升降台用于调节鸭蛋离相机的高度, 量程为 100~720 mm; 激光测距仪用于测量鸭蛋到相机的高度, 测量误差为 1 mm; 黑白方格标定板用于像距标定。数据处理采用 MATLAB2016b(美国 MathWorks 公司)。

2.2 实验与测距方法

2.2.1 相机标定与样本图像获取

实验采用双向标定法(图 1)对相机聚焦成像时的实际物距与像距进行标定。为标定实验相机真实物距及像距, 根据相机成像理论采用聚焦成像黑白方格标定方法。定焦距 $f=25$ mm, 固定焦距后调节物距大小, 拍摄最清晰图像。读取标定板上一定的方格数量及对应像素点数, 根据公式(1)求解实际物距 u 与像距 s :

$$\begin{cases} \frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{s} \\ \frac{N_{bw} \cdot d_{bw}}{N_{pixel} \cdot \mu} = \frac{u}{s} \end{cases}, \quad (1)$$

其中 N_{bw} 、 N_{pixel} 表示对应黑白方格数及像素点个数, d_{bw} 、 μ 分别表示单个方格及单个像素点的实际长度。当焦距 $f=25$ mm, $N_{bw} = 3 \times 3$, 相应的 $N_{pixel} = 1570$, $d_{bw}=15$ mm, $\mu=0.00345$ mm; 计算可得物距 u 为 232.63 mm, 像距 s 为 28.01 mm。

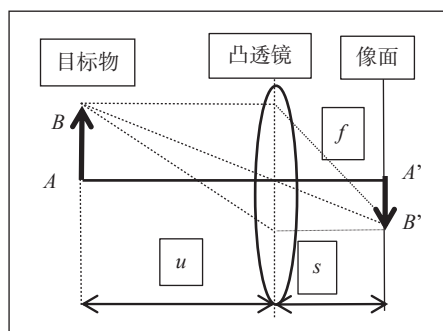


图 1 相机标定原理图

Fig. 1 Schematic diagram of camera calibration

由于目标距离成像装置过近或过远都会造成成像模糊, 为获取散焦图像, 且保证散焦成像为焦点之后的实像, 本文选择鸭蛋距离成像装置过远造成的成像模糊图像进行实验。因此, 鸭蛋的拍

摄距离需大于相机标定时的物距 232.63 mm, 故选取物距分别为 250 mm, 270 mm, ..., 430 mm, 共 10 组。实验中使用激光测距仪依次将相机到鸭蛋边缘的距离调整为上述选取的距离进行拍摄。实验样本为 6 只颜色、大小均有区别的鸭蛋, 每个样本将在上述 10 组物距下分别拍摄一组照片, 共拍摄 60 张照片, 将每个鸭蛋在每个物距下的模糊照片经过处理后, 计算出的物距与实际物距做对比。

2.2.2 图像预处理

在机器视觉领域, 非线性滤波能够较好地处理频域混叠噪声。经典滤波降噪方法有均值滤波、中值滤波、小波滤波等。中值滤波对于极大极小噪声和椒盐噪声这种类型的噪声具有较好的处理效果, 且能克服一般线性滤波器对图像细节造成模糊的问题, 可以保护图像的边缘信息^[17]。所以本实验采用中值滤波进行降噪。

此外, 为最大限度地分割包含单个目标的图像区域, 根据鸭蛋的形态学特征, 选用分水岭算法图像进行分割。该算法是在将图像三维形象化的基础上进行的, 随后以平行于 x 轴和 y 轴的矩形边进行目标裁剪^[18], 最大限度地提取鸭蛋目标, 截取的鸭蛋目标如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

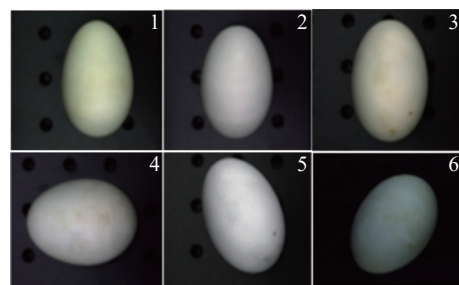


图 2 实验用鸭蛋样本

Fig. 2 Experimental samples of duck eggs

2.2.3 清晰度函数

清晰度函数(Sharpness Function, SF)在相机自动对焦技术中起着极为关键的作用, 它主要是通过综合图像信息利用数值反映图像的清晰度, 即当图像清晰时, 边缘阶跃明显, SF 较大^[19]。引入清晰度指标的另一个原因是由于现有散焦测距理论主要依据图像模糊程度的差异实现距离估计。因此, 从散焦测距理论中抽象出的清晰度函数应当对图像的模糊程度具有较高的灵敏性和可区分性, 特别是鸭蛋这类弱纹理目标, 由清晰度的

灵敏程度及可区分度来选择散焦测距方法并提升测距精度是十分必要的。

频谱函数是在傅立叶变换的基础上得到的, 图像经过二维傅立叶变换为图像的功率谱^[20]。散焦程度小的图像纹理更清晰、边缘更明显、高频分量也越多。通过傅立叶变换求解图像频谱 $F(u, v)$, 定义基于频谱的清晰度函数如公式(2)所示:

$$SF_{\text{FOURIER}} = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \quad (2)$$

拉普拉斯算子 $(\nabla^2 f(x, y))$ 具有各向同性以及旋转不变性。拉普拉斯运算即为函数二阶偏导数的线性之和, 能获取图像中灰度变化较大的区域, 即对应频域中的高频区域。通过图像与 3×3 的拉普拉斯算子卷积求和, 求解拉普拉斯变换后的图像 $\nabla^2 f(m, n)$, 定义基于拉普拉斯算子的清晰度函数为:

$$SF_{\text{Laplace}} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \nabla^2 f(m, n) \quad (3)$$

3 两种清晰度函数的比较与算法改进

根据两种散焦测距理论(基于频谱和基于梯度)构造清晰度评价函数, 通过比较二者的灵敏性, 选择一种更适于鸭蛋弱纹理目标的清晰度评价函数。另外, 本实验引入了边缘频谱保留策略, 通过选择频谱范围来最大限度地保留目标边缘信息, 为解决现有散焦测距法无法适用于弱表面纹理目标提供思路, 最后通过设计实验验证改进算法的可行性与有效性。

3.1 两种清晰度函数比较

为选择最佳清晰度函数, 本文将对这两种不同的清晰度函数进行比较。在固定鸭蛋到相机距离的情况下, 仅改变对焦程度对同一个鸭蛋在同一种姿态下拍摄 15 张清晰度不同的照片, 按照散焦-聚焦-散焦的顺序获取图像, 部分图像如图 3 所示。



图 3 部分清晰度不同的鸭蛋图像

Fig. 3 Images of duck eggs with different definitions

针对鸭蛋弱或无表面纹理特性, 避免目标以外的图像背景对算法性能的影响, 采用最小矩形包络法截取图像目标。分别对上述拍摄到的 15 张图像序列进行基于拉普拉斯算子、基于频谱函数两种清晰度函数进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。

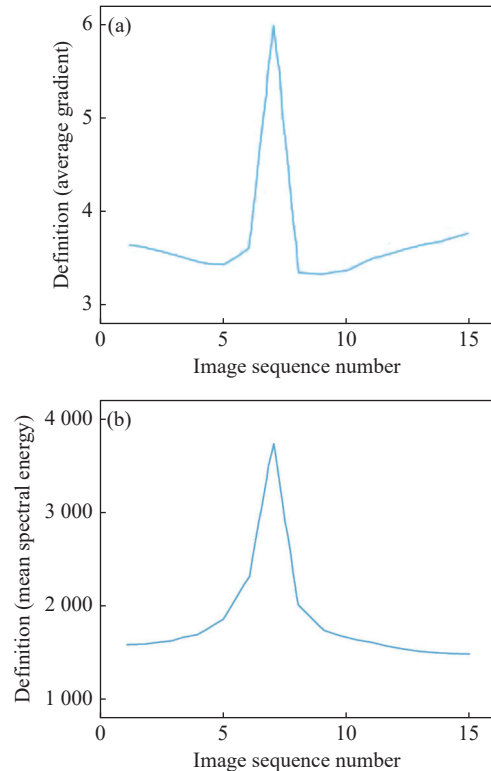


图 4 (a)基于拉普拉斯算子及(b)基于频谱的清晰度变化
Fig. 4 Sharpness changes based on (a) the Laplacian operator and (b) spectrum

由仿真结果可知, 在针对鸭蛋图像的清晰度评价问题上, 基于频谱的清晰度函数具有较强的单峰性以及较高的灵敏性及可区分度, 能够识别模糊程度差异不大的两张图像。因此, 本文选择基于频谱的散焦测距法, 即 Subbarao 散焦测距法作为清晰度评价函数。

3.2 保留边缘频谱的散焦测距法

控制目标到光学镜头的距离不变, 改变镜头光圈参数, 拍摄同一目标不同散焦程度的两幅图像, 分别记为 I_1, I_2 。记相机镜头参数分别为 $[s_1, D_1, f_1]$ 和 $[s_2, D_2, f_2]$, 其中, s 为像距, D 为光圈, f 为焦距。两幅图像的功率谱分别为 $P_1(\omega, v)$ 、 $P_2(\omega, v)$, 对应的模糊参数为 σ_1, σ_2 。则可以得到:

$$\frac{P_1(\omega, v)}{P_2(\omega, v)} = e^{-(\omega^2 + v^2)(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)} \quad (4)$$

对(4)式取自然对数:

$$\sigma_1^2 - \sigma_2^2 = -\frac{1}{\omega^2 + \nu^2} \ln \left[\frac{P_1(\omega, \nu)}{P_2(\omega, \nu)} \right] d\omega d\nu \quad (5)$$

通过求取 (ω, ν) 的功率谱密度值估计 $\sigma_1^2 - \sigma_2^2$ 的值。为减小误差, 通过公式(6)求 C 的平均值, 即:

$$C = \frac{1}{A} \iint_R -\frac{1}{\omega^2 + \nu^2} \ln \left[\frac{P_1(\omega, \nu)}{P_2(\omega, \nu)} \right] d\omega d\nu \quad (6)$$

其中: R 为所选取的频域区域, A 为该区域的面积, C 为 $\sigma_1^2 - \sigma_2^2$ 的平均估计值, 即:

$$\sigma_1^2 - \sigma_2^2 = C \quad (7)$$

已知:

$$\begin{cases} \sigma_1 = 2k_1 R_1 = k_1 D_1 s_1 \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s_1} \right) \\ \sigma_2 = 2k_2 R_2 = k_2 D_2 s_2 \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s_2} \right) \end{cases} \quad (8)$$

消掉式(8)中的 u , 同时做如下的代换:

$$\alpha = \frac{k_1 D_1 s_1}{k_2 D_2 s_2}, \beta = k_1 D_1 s_1 \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} \right) \quad (9)$$

可得 σ_1, σ_2 的关系表达式:

$$\sigma_1 = \alpha \sigma_2 + \beta \quad (10)$$

综合上述各式可以得到:

$$(\alpha^2 - 1)\sigma_2^2 + 2\alpha\beta\sigma_2 + \beta^2 = C \quad (11)$$

式(11)是关于 σ_2 的一元二次方程, 应该有两个解, 当 $D_1 = D_2$ 时, 判别式(11)为零方程, 方程有两个相等的解。解出 σ_2 后, 代入公式(8)中第二个公式即可求得物距 u :

$$u = \frac{-k_2 D_2 s_2 f_2}{f_2 \sigma_2 + k_2 D_2 (f_2 - s_2)} \quad (12)$$

根据上述理论可知, 在计算 $\sigma_1^2 - \sigma_2^2$ 的平均估计值 C 的过程中, 需要选取特定的频率范围进行求解, 以降低拍摄过程中噪声等因素的影响。正常情况下是直接从图像中提取局部块, 带入公式求解即可。当针对鸭蛋等弱表面纹理目标时, 局域块的信息较少。为解决这一问题, 本实验将通过一种边缘信息保留策略选取最佳频域范围, 从而实现了对鸭蛋目标的有效测距。

图5为两幅清晰度明显不同的鸭蛋照片及其频谱图, 根据频谱图显示, 图5(a)和图5(d)的次低频部分有明显差异, 但是在 $\omega = 0$ 或 $\nu = 0$ 的中心低频区域和亮斑区域以外的平坦区域有相似的低频或高频特征。一般而言, 低频直流部分反映图像整体或平均灰度信息, 高频部分反映了噪声信息, 次高频频谱区域则代表着图像细节信息。为了抑制频谱其他区域的影响, 提高频谱信息对不同模糊图像的灵敏性和可区分性, 提升测距精度, 本实验屏蔽低频直流分量和高频噪声分量, 截取中间差异明显的频率部分, 再采用傅立叶逆变换得到原时域图, 选取能够反映边缘差异的频率分段。经过分析及多次实验, 选取频谱范围为 $\omega \in [3, M/40], \nu \in [3, N/40]$ (其中 $M \times N$ 表示截取鸭蛋图像的大小)时对应原图表现的边缘效果最佳, 截取频率后的清晰度变化结果和原清晰度结果如图6所示。

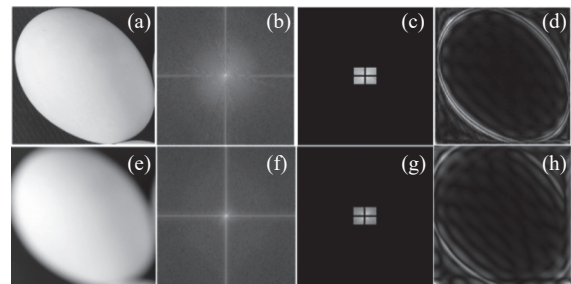
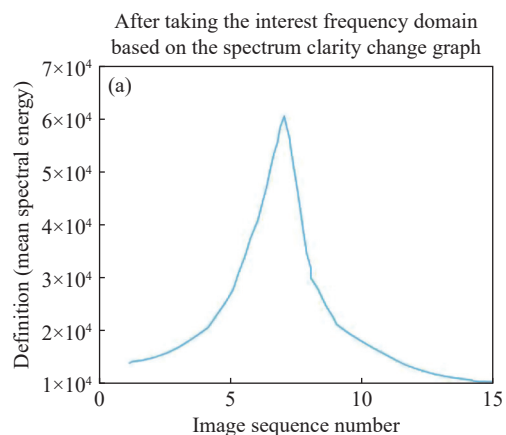


图5 (a)与(e)为鸭蛋图像, (b)与(f)为原频谱图, (c)与(g)为边缘保留频率截取图, (d)与(h)为频率截取后的频谱图像对应的时域图像

Fig. 5 (a) and (e) are egg images, (b) and (f) are original spectral images, (c) and (g) are frequency-intercepted spectral images, (d) and (h) are time-domain images corresponding to the spectral images after frequency interception



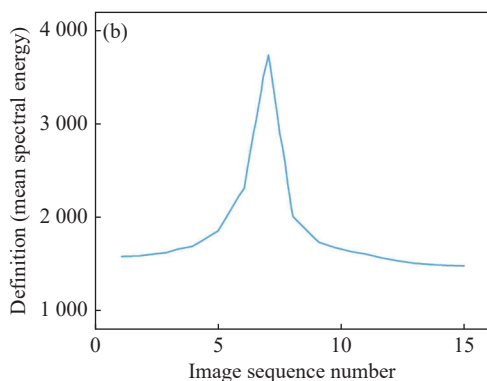


图 6 (a) 频率截取后的清晰度变化图; (b) 原清晰度变化图
Fig. 6 (a) The definition change curve after the frequency interception; (b) the change of original definition

由图 6 可以看出: 选取能够反映边缘部分的频率段作为清晰度评价函数主体, 相比于截取前的评价函数不仅能保留其单峰性, 还能大幅度提高其灵敏性, 即图像模糊差异不大时, 清晰度函数也能够很好地反映出图像模糊差异。

通过上述分析, 本文将基于边缘保留的散焦测距算法步骤总结如图 7 所示。

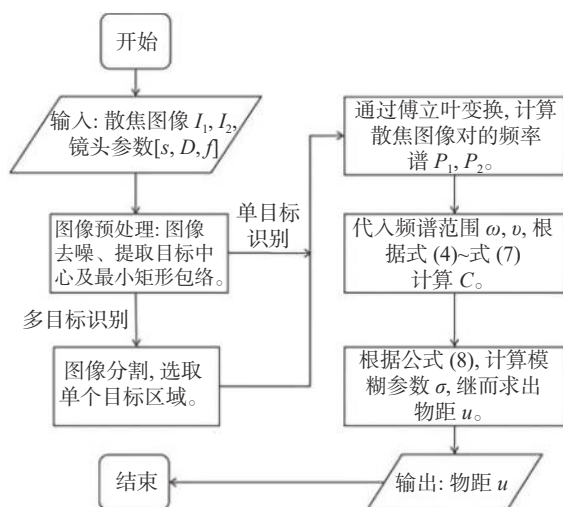


图 7 基于边缘保留散焦图像测距算法流程图

Fig. 7 The flow chart of ranging algorithm based on edge retaining defocus image

3.3 评价方法

将由改进后的算法计算所得的距离与真实距离进行比较, 通过相关系数、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和平均相对误差进行评价。均方根误差公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{(x_{\text{obsi}} - x_{\text{cali}})^2}{n}} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

相对误差公式为:

$$\varepsilon_i = \left| \frac{x_{\text{cali}} - x_{\text{obsi}}}{x_{\text{obsi}}} \right| \times 100\% \quad , \quad (14)$$

其中, x_{obsi} 表示真实距离, x_{cali} 表示计算距离。

4 结果与分析

经边缘信息保留策略选择频率范围后, 根据 Subbarao 散焦测距理论, 对 6 组鸭蛋图像进行求解, 实际距离与计算距离的相关系数如图 8 所示。

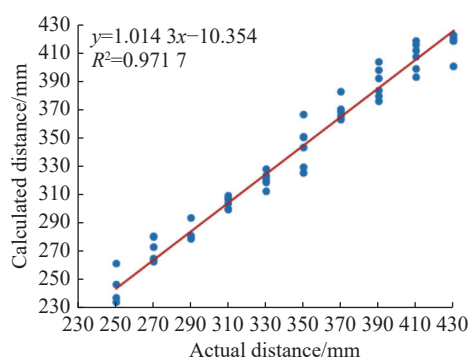


图 8 实际距离与计算距离相关系数图

Fig. 8 The correlations between observed distance and calculated distance

图 8 记录了每个鸭蛋在不同距离下的散焦测距与实际距离的关系, 经计算, 相关系数为 0.986, RMSE 为 11.39 mm, 结果较好。各组的测量值与计算值的均方根误差和平均相对误差如表 1 所示。

表 1 实际距离与计算距离实验结果

Tab. 1 The results of observed distance and calculated distance

序号	鸭蛋特征	最大误差 (mm)	均方根误差 (mm)	平均相对误差 (%)
1	绿壳、竖放	10.90	6.59	1.63
2	白壳、竖放	16.60	10.22	2.87
3	白壳、竖放	16.99	10.65	2.98
4	白壳、横放	13.92	8.30	2.24
5	白壳、斜放	29.44	16.93	4.31
6	绿壳、斜放	24.75	12.73	3.08
总计		29.44	11.39	2.85

根据表 1 可以大致得到以下结论: 序列号为 1~4 的鸭蛋由本文改进算法测出的距离与实际距

离的最大误差基本控制在 2 cm 以内, 平均相对误差也基本控制在 3% 以内。序列号为 5~6 的两个鸭蛋测量距离与实际距离误差相对较大, 即具有一定旋转角度(任意倾斜)的鸭蛋图像对结果的影响较为明显。主要原因在于, 频谱形状与对应原图像目标位置无关, 但与其旋转方向具有高度相关性, 主要表现为图像目标旋转一定角度, 对应频谱形状会沿相同方向旋转相同角度。该特性会极大程度地影响本实验对频率范围的截取操作。为验证摆放位置对实验造成的误差, 对斜放的 5 号和 6 号鸭蛋图像进行图像旋转, 使之变为横放或竖放, 再进行物距计算, 旋转前后的图像分别如图 9(a)、9(b)所示。旋转后再对鸭蛋目标进行裁剪, 并采用改进算法进行求解, 结果如表 2 所示。

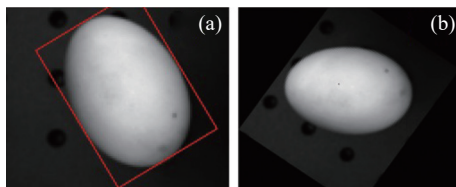


图 9 图像旋转示意图。(a)原图;(b)旋转后图像
Fig. 9 The process of image rotation. (a) Original image; (b) rotated image

表 2 图像旋转前后测距结果对比

Tab. 2 The ranging results before and after image rotating

序号	处理方式	最大误差 (mm)	均方根误差 (mm)	平均相对误差 (%)
5	原始图像	29.44	16.93	4.31
	图像旋转后	13.55	8.72	2.25
6	原始图像	24.75	12.73	3.08
	图像旋转后	14.82	5.93	1.73
总计	原始图像	29.44	11.39	2.85
	图像旋转后	16.99	8.76	2.28

根据表 2 可知, 鸭蛋图像经旋转之后, 测距性能得到明显改善。第 5 组的均方根误差由 16.93 mm 下降至 8.72 mm, 平均相对误差由 4.31% 下降至 2.25%, 第 6 组均方根误差由 12.73 mm 下降至 5.93 mm, 平均相对误差由 3.08% 下降至 1.73%。对全部样本来说, 第 5 组和第 6 组图像旋转前后测距均方根误差从 11.39 mm 下降至

8.76 mm, 平均相对误差从 2.85% 下降至 2.28%。样本计算距离与实际距离相关系数图如图 10 所示, 可见相关系数提升至 0.99。根据此结果可知, 倾斜放置的鸭蛋对测距性能具有较大影响。通过图像旋转处理法能够显著提升测距效果。

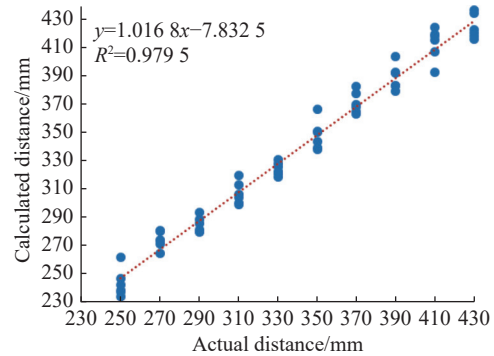


图 10 斜放鸭蛋经旋转处理后实际距离与计算距离相关系数图

Fig. 10 The correlation between observed distance and calculated distance for oblique duck eggs after rotation treatment

根据表 1、表 2 所示结果, 最佳测距结果的最大误差为 16.99 mm, RMSE 为 8.76 mm, 平均相对误差为 2.28%。该结果表明: 基于边缘频谱保留策略的散焦测距方法与目标旋转纠正的目标测距方法相结合适应性较强, 测距性能良好。在计算过程中提取了相应的清晰度, 发现清晰度的自然对数与物距存在正相关关系, 即:

$$u = \alpha \ln(SF) + \beta \quad (15)$$

其中 u 为物距, SF 为清晰度值, α 、 β 为拟合系数。

取 4 号鸭蛋作为拟合模型, 由 MATLAB 曲线拟合工具箱求解, 得:

$$u = -91.97 \times \ln(SF) + 1349 \quad (16)$$

通过线性拟合得到的模型计算物距, 结果如表 3 所示。

4 号鸭蛋的 10 组照片清晰度变化图如图 11 所示, 取自然对数以后清晰度与物距关系图如图 12 所示, 拟合结果如表 4 所示。

由表 4 中结果可知 R^2 估计值为 0.9968, 均方误差为 3.62 mm。线性拟合模型的计算结果如图 13(彩图见期刊电子版)所示, 其中最大误差为 5.36 mm, 最大相对误差不超过 2%, 误差较为理想。

表 3 拟合模型所得结果

Tab. 3 The results of fitting model

序号	实际距离/mm	计算距离/mm	误差/mm	相对误差/%
1	250	246.82	-3.18	-1.27
2	270	273.41	3.41	1.26
3	290	285.12	-4.88	-1.68
4	310	310.62	0.62	0.20
5	330	332.27	2.27	0.69
6	350	354.30	4.30	1.23
7	370	372.32	2.32	0.63
8	390	390.98	0.98	0.25
9	410	409.52	-0.48	-0.12
10	430	424.64	-5.36	-1.25

表 4 拟合模型参数表

Tab. 4 Parameters of fitting model

α	β	SSE	R^2	RMSE
-91.97 (-96.21,-87.74)	1349 (1302,1395)	104.9	0.9968	3.62

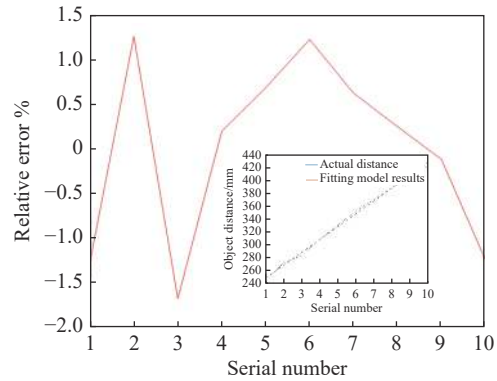


图 13 拟合模型计算物距的相对误差

Fig. 13 The relative error of the object distance from fitting model

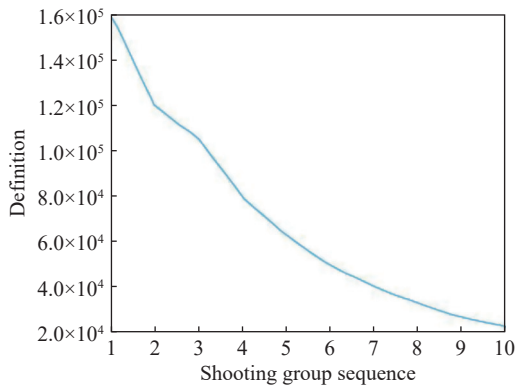


图 11 4号鸭蛋 10组照片清晰度变化图

Fig. 11 Clarity change of group 10 of egg No. 4

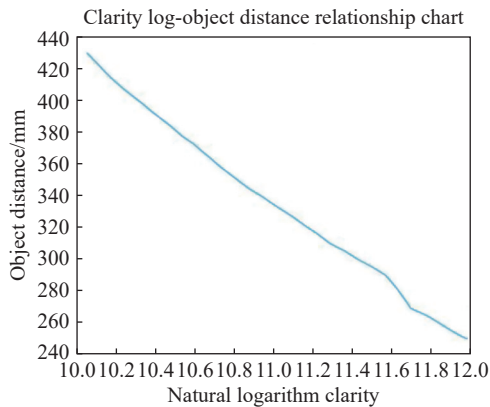


图 12 4号鸭蛋取自然对数清晰度与物距关系图

Fig. 12 Relationship between natural logarithmic clarity and object distance of egg No. 4

5 结 论

本文基于机器视觉技术,以单目相机拍摄的鸭蛋图像为例,利用图像预处理和清晰度评价函数对鸭蛋图像的灵敏度和可区分度进行比较,证明了基于频谱的散焦测距法能应对弱或无明显纹理特征的视觉目标,同时针对 Subbarao 散焦测距法在这类应用场景中的局限性对基于边缘信息保留策略进行优化改进。将体现鸭蛋边缘的频谱部分作为算法输入,通过过滤高频噪声、屏蔽低频直流部分的频率,并利用傅立叶逆变换,得到最能体现图像边缘的频谱范围,使该算法能够适应弱或无明显表面纹理的研究对象。

经过对比斜放和经旋转后的图像测距效果,得到斜放的鸭蛋对测距性能具有较大影响。通过对图像进行旋转处理,可以较好地提升该方法的测距能力,实际距离与计算距离的相关系数为 0.99, RMSE 为 8.76 mm。基于边缘频谱散焦图像的改进测距算法可以根据目标对象的特点选用其他一些图像预处理方法,以提升空间距离测定精度。

参考文献:

[1] GONGAL A, AMATYA S, KARKEE M, *et al.*. Sensors and systems for fruit detection and localization: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 116: 8-19.

[2] 蔡明兵, 刘晶红, 徐芳. 无人机侦察多目标实时定位技术研究[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 812-821.

- CAI M B, LIU J H, XU F. Multi-targets real-time location technology for UAV reconnaissance[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 812-821. (in Chinese)
- [3] MIRHAJI H, SOLEYMANI M, ASAKEREH A, *et al.*. Fruit detection and load estimation of an orange orchard using the YOLO models through simple approaches in different imaging and illumination conditions[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 191: 106533.
- [4] 张石磊, 崔宇, 邢慕增, 等. 光场成像目标测距技术[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1332-1342.
ZHANG SH L, CUI Y, XING M Z, *et al.*. Light field imaging target ranging technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1332-1342. (in Chinese)
- [5] 熊锐. 基于数字图像处理的显微自动对焦技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021.
XIONG R. Study on microscopic autofocus technology based on digital image processing[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [6] 李喆, 李建增, 胡永江, 等. 基于频谱预处理与改进霍夫变换的离焦模糊盲复原算法[J]. *图学学报*, 2018, 39(5): 909-916.
LI ZH, LI J Z, HU Y J, *et al.*. Blind restoration of focus blur based on spectrum preprocessing and improved Hough transform[J]. *Journal of Graphics*, 2018, 39(5): 909-916. (in Chinese)
- [7] RASHWAN H A, CHAMBON S, GURDJOS P, *et al.*. Using curvilinear features in focus for registering a single image to a 3D object[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 28(9): 4429-4443.
- [8] SUBBARAO M. Direct recovery of depth-map I: differential methods[C]. *Proceedings of the IEEE Computer Society Workshop on Computer Vision*, IEEE, 1987: 58-65.
- [9] SUBBARAO M, SURYA G. Depth from defocus: a spatial domain approach[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(3): 271-294.
- [10] RAJAGOPALAN A N, CHAUDHURI S, MUDENAGUDI U. Depth estimation and image restoration using defocused stereo pairs[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(11): 1521-1525.
- [11] 王海娟. 基于散焦图像的深度估计的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
WANG H J. Study on the estimate of depth based on defocus image[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. (in Chinese)
- [12] 马艳娥. 基于散焦图像测距的目标尺寸测量技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
MA Y E. Research of objective measuring technique based on image distance measurement by defocusing[D]. Taiyuan: North University of China, 2012. (in Chinese)
- [13] 薛松, 王文剑. 基于超像素分割的单幅散焦图像深度恢复方法[J]. *计算机科学与探索*, 2018, 12(7): 1162-1168.
XUE S, WANG W J. Depth estimation from single defocused image based on superpixel segmentation[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2018, 12(7): 1162-1168. (in Chinese)
- [14] 薛松, 王文剑. 基于高斯-柯西混合模型的单幅散焦图像深度恢复方法[J]. *计算机科学*, 2017, 44(1): 32-36.
XUE S, WANG W J. Depth estimation from single defocused image based on Gaussian-Cauchy mixed model[J]. *Computer Science*, 2017, 44(1): 32-36. (in Chinese)
- [15] 韩丽燕, 王黎明, 刘宾. 一种基于边缘扩散函数描述散焦程度的测距算法[J]. *传感器世界*, 2011, 17(2): 9-11.
HAN L Y, WANG L M, LIU B. Depth measuring method based on using edge spread function to describe defocusing degrees of images[J]. *Sensor World*, 2011, 17(2): 9-11. (in Chinese)
- [16] 袁红星, 吴少群, 安鹏, 等. 对象引导的单幅散焦图像深度提取方法[J]. *电子学报*, 2014, 42(10): 2009-2015.
YUAN H X, WU SH Q, AN P, *et al.*. Object guided depth map recovery from a single defocused image[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(10): 2009-2015. (in Chinese)
- [17] ERKAN U, ENGINOĞLU S, THANH D N H, *et al.*. Adaptive frequency median filter for the salt and pepper denoising problem[J]. *IET Image Processing*, 2020, 14(7): 1291-1302.
- [18] 刘聪, 董文飞, 蒋克明, 等. 基于改进分水岭分割算法的致密荧光微滴识别[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 783-790.
LIU C, DONG W F, JIANG K M, *et al.*. Recognition of dense fluorescent droplets using an improved watershed segmentation algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 783-790. (in Chinese)
- [19] PENTLAND A, SCHEROCK S, DARRELL T, *et al.*. Simple range cameras based on focal error[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(11): 2925-2934.

- [20] 葛鹏, 游耀堂. 基于稀疏表示的光场图像超分辨率重建[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0210001.
GE P, YOU Y T. Super-resolution reconstruction of light field images via sparse representation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0210001. (in Chinese)

作者简介:



介邓飞(1982—),男,山西运城人,博士,副教授,硕士生导师,2014年于浙江大学获得博士学位,现为福建农林大学机电工程学院副教授,主要从事测控技术与智能装备方面的研究。E-mail: jiedengfei@163.com