

DOI:10. 19650/j. cnki. cjsi. J2312250

面向大跨度场景的全景深快速聚焦成像法^{*}

魏浩东¹, 杨宝权¹, 王周义², 张兴国¹, 邢强¹

(1. 南通大学机械工程学院 南通 226019; 2. 南京航空航天大学深圳研究院 深圳 518000)

摘要:非结构化场景在特种行业中作用十分关键,保证其内表面健康检测对装置的安全运行至关重要。但其内表面景深跨度大,极易引起常规相机成像时的景深不足或景深误匹配,致使聚焦模糊,影响表面缺陷检测效果。因此,本文提出了基于极值搜索算法的聚焦跟踪曲线快速构造法,并实现了相机的快速高清成像。首先,建立了聚焦跟踪曲线的基本构造方法;其次,提出了极值搜索算法,简化曲线构造过程;最后,设计基于A/B标定板的单/多聚焦跟踪曲线构造方式,并分析其对成像清晰度的影响。结果表明,本算法在准确聚焦的同时,有效减少了图像采集次数且将聚焦速度提高了34.8%。基于多聚焦跟踪曲线的全景深成像,其图像客观评价指标均值提高了10.35%。可实现100~1 000 mm景深跨度下0.5 mm裂纹的清晰分辨。因此,该方法能为常规相机的非结构化场景中高清全景深成像提供解决方案。

关键词:非结构化场景;跟踪曲线;自动聚焦;全景深

中图分类号:TH89 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:520.6040

Fast focus method for full depth of field in large-span scenes

Wei Haodong¹, Yang Baoquan¹, Wang Zhouyi², Zhang Xingguo¹, Xing Qiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. Shenzhen Research Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Unstructured scenarios play a critical role in specialty industries, where ensuring the health of their internal surfaces is essential for the safe operation of the device. However, the large depth-of-field variations within these surfaces often lead to insufficient or mismatched depth-of-field in conventional camera imaging, resulting in out-of-focus blur and poor defect detection. Therefore, this paper proposes a fast construction method of focused tracking curve based on an extreme value search algorithm, and realizes fast high-definition imaging. Firstly, the basic construction method of the focused tracking curve was established. Secondly, an extreme value search algorithm is proposed to simplify the curve construction process. Finally, the construction of single/multi-focus tracking curves based on A/B calibration plates was designed, and its influence on imaging clarity was analyzed. The results show that, the proposed algorithm effectively reduces the number of image acquisition times and increases the focusing speed by 34.8% while focusing accurately. Based on the multi-focus tracking curve, the average value of the objective evaluation index of the image is increased by 10.35%. Clear resolution of 0.5 mm cracks is achieved under 100~1 000 mm depth of field span. Therefore, this method can provide a solution for high-definition full depth imaging in unstructured scenes with conventional cameras.

Keywords: unstructured scenes; tracking curves; autofocus; full depth of field

0 引言

非结构化场景在特种行业具有十分关键的作用,实现其内表面细小缺陷的快速检出是保障非结构化腔体装

置安全运行的关键^[1]。区别于常规管道场景^[2],当面对具有截面变化特征的非结构化场景时,能否快速准确的确定聚焦位置直接影响成像质量的优劣。自动聚焦是确定聚焦位置最直接的方法,主要有主动式聚焦^[3-4]和被动式聚焦^[5-10]。在主动式聚焦方面,冯华君^[11]在对焦系统

收稿日期:2023-12-07 Received Date: 2023-12-07

^{*} 基金项目:南通市基础科研研究面上项目(JC22022075)、广东省基础与应用基础研究项目(2023A1515010773)资助

中采用PSD器件作为接收传感器进行主动测距迅速获得离焦量以准确对焦;然而主动式测距速度快,但深度连续变化的非结构化场景中的频繁测距导致稳定性不足。在被动式聚焦方面,吴洪妍等^[12]提出一种结合自适应步长和两步搜索法的分区搜索算法(partition search algorithm, PSA)来提高算法的抗干扰能力;Jia等^[13]将改进的爬山搜索算法(improved laplacian operator and mountain-climb search algorithm, IMSA)分为确定小焦点区域粗聚焦和基于函数逼近的精细聚焦方法来提高聚焦精度。自动聚焦方法可以实现某聚焦距离的快速确定,但面对内表面大跨度景深变化时需要的多聚焦距离位置时,常因景深不足或景深匹配错误^[14],导致难以清晰成像或成像速度缓慢等问题。

实现非结构化场景中景深差异大的快速全景深成像,常基于相机的变焦跟踪法采集全景深范围内不同聚焦位置下序列图像,并通过图像融合实现深度范围内多聚焦位置下的序列聚焦图像融合^[15-18]。常见的变焦跟踪方法有查表法、几何法、自适应法、预测法、反馈法、相关法等方法。查表法^[19-20],通过查表的方式选择最接近的曲线来估计真实迹线,但需大量存储空间;几何法^[21],利用近、远目标的两条轨迹曲线的线性插值得到轨迹曲线的估计值,无法解决变焦电机从广角端到望远端的变焦跟踪问题;自适应法^[22],优化了变焦电机广角端到望远端的调节过程中提高了跟踪精度,但因校正步骤导致变焦操作的较大延时;预测法^[23],通过机器学习方法可以提高变焦跟踪的精度,但依赖场景的先验信息;反馈法^[24],在传统的几何法估计的基础上通过PID闭环反馈修正跟踪曲线,在运动场景中具有较强的适应性,但也存在着控制参数选择困难的问题;相关法^[25],在于建立物距与对焦位置间对应关系,获得一条估计跟踪曲线,当应用于全景深成像时,存在距离误差会导致成像质量较低。但相较于定焦相机,变焦相机在变焦时容易产生图像畸变,并且由于变焦导致的光线变化可能造成图像质量下降。

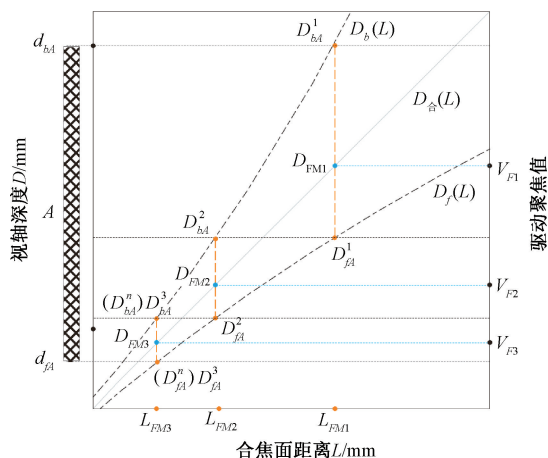
在非结构化场景全景深成像过程中,常存在视场差异大,景深不匹配等问题,容易造成图像跟踪丢失。鉴于定焦相机的视场广、成像质量高等优点,本文提出了一种基于极值搜索算法的聚焦跟踪曲线快速构造法。首先,根据“前后景深”特性曲线,提出了建立聚焦跟踪曲线的基本方法;其次,针对聚焦跟踪曲线快速构造的实验过程,提出了具有快速、准确、稳定特性的极值搜索算法(下文称为极值搜索算法),并比较分析了其准确性、稳定性及快速聚焦能力;最后,创新性地使用了A/B型标定板进行相机单/多聚焦跟踪曲线构造,并分析不同构造方式对成像清晰度的影响,验证聚焦曲线构造法的快速聚焦和清晰成像的能力,从而指导实现在大景深范围内的快速高清晰全景深成像。

1 理论分析

1.1 聚焦跟踪曲线的建立

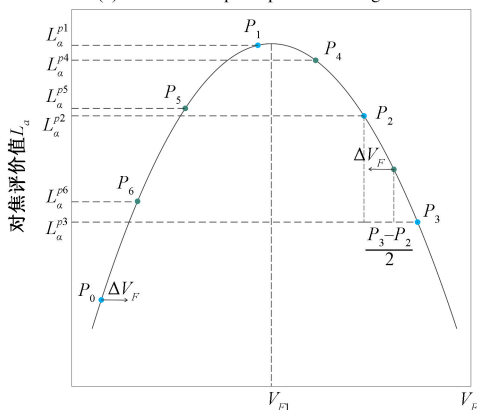
传统定焦相机只能在一定景深范围内清晰成像以获取场景图像,无法适应非结构化、大跨度变景深的场景。王爽杰等^[15]提出了大景深区间划分成像的方法,实现了在非结构化场景中基于划分区间内中间深度的聚焦成像,即通过多次聚焦图像融合获取全景深图。在此基础上,为进一步提高大场景内的全景深成像质量,本文构造一种适应于大景深范围的聚焦跟踪曲线,从而实现在非结构化场景中的快速、稳定全景深高清晰成像。

如图1(a)所示,当目标场景A视野范围处于深度 $[d_{fa}, d_{ba}]$ 时,此时目标所处深度范围无法通过一次成像获得全景深清晰图像,因此将深度 $[d_{fa}, d_{ba}]$ 分割为景深区间集合 $\{(D_{fa}^i, D_{ba}^i)\}$ (其中, $i=1, 2, 3, \dots, n$),在景深区间集合 $\{(D_{fa}^i, D_{ba}^i)\}$ 内存在匹配的合焦面距离集合 $\{D_{FMi}\}$,且 $D_{FMi}=D_{\text{合}}(L_{FMi})=L_{FMi}$ 。文献^[15]通过对景深



(a) 聚焦曲线构建原理

(a) Construction principle of focusing curve



(b) 聚焦位置与对焦评价价值判断示意图

(b) Focus position and focus evaluation value judgment dia-gram

图1 全景深快速聚焦原理

Fig. 1 Fast focusing principle for full depth of field

区间所解算后的合焦面位置采用中间深度聚焦方法确定聚焦位置,将各景深区间聚焦成像结果融合获得全景深图像。因此,为了进一步提高全景深成像质量,分别在景深区间集合 $\{(D_{fa}^i, D_{ba}^i)\}$ 内利用极值搜索算法进行准确聚焦,建立类似如图1(b)所示的 $L_a - V_F$ 关系曲线图,确定最佳聚焦位置,从而确定最佳清晰位置时的驱动聚焦值集合 $\{V_{Fi}\}$,并且通过前-后景关系曲线计算得到合焦面距离集合 $\{D_{FMi}\}$ 。

将各景深区间所匹配的合焦面距离集合 $\{D_{FMi}\}$ 与驱动聚焦值集合 $\{V_{Fi}\}$ ($i=1,2,3,\dots,n$)进行曲线拟合,构造聚焦跟踪曲线,如式(1)所示。

$$V_{Fi} = f(D_{FMi}) \quad (1)$$

其中,驱动聚焦值 V_{Fi} 是由清晰度成像实验枚举获得,并用以驱动相机聚焦获得清晰图像。图1(b)表示在景深区间 (D_{fa}^1, D_{ba}^1) 利用极值搜索算法得到的曲线图。

利用聚焦跟踪曲线对不同深度分布的非结构化场景进行成像时,由测距传感器获取场景深度范围,再结合聚焦跟踪曲线得到深度范围所划分的景深区间内最佳聚焦位置,进行成像及图像融合,从而快速获取全景深高清晰图像。

1.2 极值搜索算法

构造聚焦跟踪曲线可获得相应的最佳聚焦位置。在确定最佳聚焦位置的传统搜索算法中,全局搜索法是以相机在各聚焦位置的图像清晰度来确定最佳聚焦位置,虽精度高但搜索效率低;爬山算法以固定步长搜索图像最大清晰度所对应最佳聚焦位置,具有实时性好的优点。但当焦点距离较远时,爬山算法容易陷入假峰现象,导致聚焦错误。

为了在大跨度非结构化场景中快速提取各景深范围内最佳聚焦位置,提出了一种基于曲线拟合的极值搜索算法,解决了爬山算法中陷入局部峰值的问题,实现最佳聚焦位置的快速搜索。同时采用表征图像边缘和细节特征的拉普拉斯算子作为各聚焦位置图像清晰度的评价标准来确定最佳聚焦位置,其对焦评价函数如式(2)所示。

$$L_a = \sum_x \sum_y |g(x,y) - g(x,y+1)| + |g(x,y) - g(x,y-1)| + |g(x,y) - g(x-1,y)| + |g(x,y) - g(x+1,y)| \quad (2)$$

其中, $g(x,y)$ 表示 (x,y) 处的灰度值, L_a 值为当前图像聚焦效果评价结果。结合评价标准,极值搜索算法流程具体步骤如下:

1) 基于驱动聚焦值给定初始聚焦位置 P_0 ,调整相机驱动聚焦值以恒定步长 ΔV_F 沿图像清晰度增大方向搜索,采用拉普拉斯对焦评价函数值 $L_a^{P_i}$ 来表征在相应位置的图像清晰度。

2) 连续成像,并通过对焦评价函数值 L_a 来判断真峰

值所在区间:若 $L_a^{P_3} < L_a^{P_2} < L_a^{P_1}$ (判断条件(1)),表明对焦评价函数值连续变小,则记录对应聚焦位置为 P_1 (与对焦评价函数值 $L_a^{P_1}$ 一一对应),同时继续搜索,记录相应的图像清晰度连续两次下降对应的聚焦位置分别为 P_2, P_3 ,如图1(b)所示。

3) 若 $L_a^{P_2} < L_a^{P_1}$ 且 $L_a^{P_3} > L_a^{P_2}$,即出现局部峰值,则以 $L_a^{P_2}$ 为聚焦位置分界点,改变步长 ΔV_F ,对左右两分区重复步骤1)~2)进行聚焦位置搜索,直至满足判断条件(1)。

4) 在聚焦位置为 $(P_3 - P_2)/2$ 处沿相反方向以恒定步长 ΔV_F 进行搜索,重复步骤1)~2),当有 $L_a^{P_6} < L_a^{P_5} < L_a^{P_4}$ 时,则记录对应聚焦位置为 P_4 ,此时清晰度连续下降两次的聚焦位置分别为 P_5, P_6 。

5) 在爬山搜索过程中,记录6个对焦评价函数值($L_a^{P_i}, i=1,2,3,\dots,6$)及对应聚焦位置($P_1 \sim P_6$),并利用离散对焦评价函数值与聚焦位置参数进行曲线拟合,即可获得最佳聚焦位置。

2 实验装置与基本实验步骤

为构造聚焦跟踪曲线,搭建了聚焦跟踪曲线标定实验装置。该装置主要由运动模块、标定模板以及控制器组成。

运动模块主要由步进直线电机、拉线编码器和导轨实现待测相机在视轴方向上与待测目标的间距 D_i 的调节。标定模板主要采用可构造不同的景深范围的A型与B型。如图2(b)所示,B型标定板上竖直放置小标定板(A1~A5),以1951USAF分辨率测试图作为标定模板。待测相机则是自主开发的具有测距-聚焦功能一体的聚焦相机,选用Sony公司IMX477为感光器件及适配的AF摄像头(参数为:焦距 $f=3.9$,光圈 $F=2.8$,有效聚焦距离为 $40 \sim \infty$ mm)。控制器则选用RaspberryPi 4B进行AF镜头、运动模块的控制调节。成像系统主要进行图像采集、清晰度评价及图像融合。在实验中,固定待测相机,设定场景深度,根据构建聚焦跟踪曲线的实验步骤,利用RaspberryPi 4B控制器调整相机到目标的距离 D_i (即物距)、调节 ΔV_F 及图像采集与数据分析,标定系统即可自动实现聚焦曲线的标定,系统结构如图2(a)所示。其中,构建聚焦跟踪曲线的步骤如下:

1) 利用测距传感器获得场景深度,根据待测环境景深特性,设定深度范围 $[d_f, d_b]$;结合大景深划分区间成像方法,分割为景深为区间集合 $\{(D_{fa}^i, D_{ba}^i)\}$ 并计算所对应的合焦面深度集合 $\{D_{FMi}\}$,其中 $i=1,2,3,\dots,n$, n 为景深分割量。

2) 根据景深区间集合 $\{(D_{fa}^i, D_{ba}^i)\}$ 位置调节相机距离 D_i 并放置标定板,RaspberryPi 4B控制相机聚焦成像

及分析图像清晰度,根据极值搜索算法,分别求取最佳聚焦位置对应的驱动聚焦值 $\{V_{Fi}\}$ 。

3) 得到若干组不同景深区内合焦面深度 D_{FMi} 处的最佳驱动值 V_{Fi} ,以 (D_{FMi}, V_{Fi}) 为坐标点进行曲线拟合,得到“ $D_{FMi}-V_{Fi}$ ”关系曲线。

4) 如图2(b)所示,当需要固定单一位置平面进行聚焦曲线标定时,则使用A型标定板,通过调节相机与A型标定板距离 D_i ,求取对应的驱动聚焦值 $\{V_{Fi}\}$,将得到“ D_i-V_{Fi} ”关系曲线,即单聚焦跟踪曲线。采用B型标定板进行实验,即可获得与B型对应的多聚焦跟踪曲线。

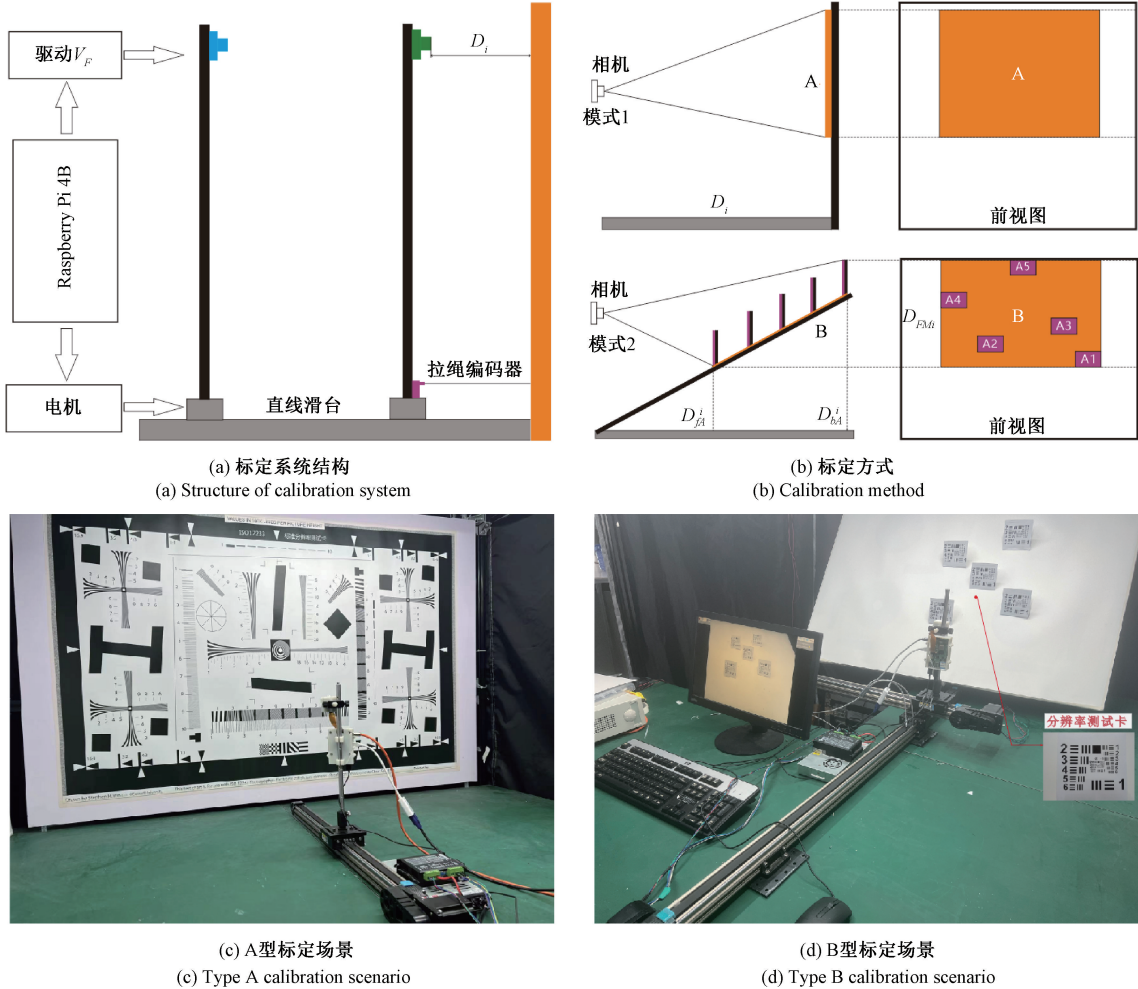


图2 聚焦曲线构建实验
Fig. 2 Focus curve construction experiment

3 实验验证

3.1 极值搜索算法的实验结果与分析

在目标距离 D_i 处进行最佳聚焦位置确定的成像实验中,以全局搜索的对焦评价 L_a 及成像稳定性为表征的驱动聚焦值 V_F 做参照,进行本文算法与PSA^[12]及IMSA^[13]算法在成像聚焦准确性、稳定性、搜索效率等方面的比较。

在成像聚焦准确性方面,以全局搜索算法驱动聚焦参数为基准,PSA、IMSA和极值搜索算法在不同 D_i 处都

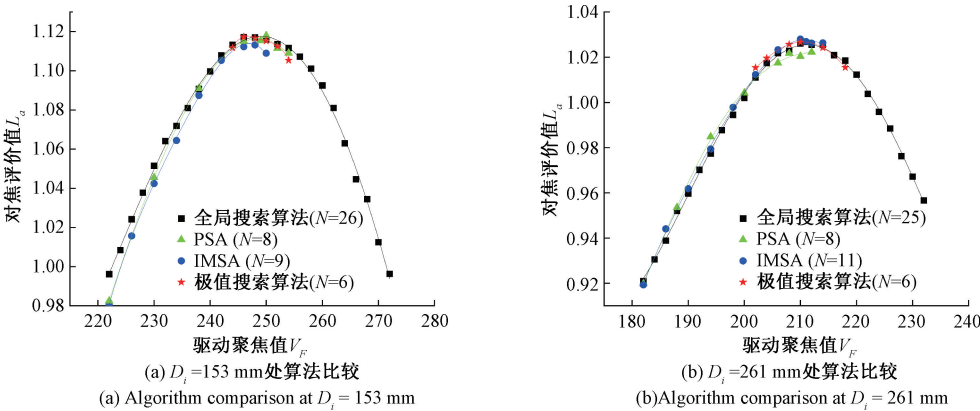
获得的相近的驱动聚焦参数,结果如表1及图3所示。在对焦评价函数的单峰性方面,全局搜索算法、IMSA和极值搜索算法具有比较稳定的最佳聚焦位置搜索过程且能够保持趋势一致。在聚焦成像稳定性方面,从表2中任选5个目标距离 D_i 进行重复实验。与全局搜索算法相比较,实验结果表明,当目标距离 D_i 较小时,传统爬山算法、PSA、IMSA及极值搜索算法均具有稳定的最佳聚焦位置搜索能力,且具有较好的聚焦成像清晰度;当目标距离 D_i 较大时,传统爬山算法、PSA及IMSA的成像图像的驱动值和对焦评价不稳定,体现出其抗干扰能力较弱,在实际测量中会导致最佳聚焦位置的模糊或无法判

断。而极值搜索算法在较大的距离范围内均体现出了较高的搜索聚焦成像稳定性,从而提高了搜索效率。在搜索与计算时间方面,PSA 和 IMSA 图像采集次数基本一致;而极值搜索算法在较少图像采集次数的同时保持了相同聚焦准确率,可有效提高搜索效率,降低了计算时间。结果如图 3 所示,其中 N 为图像采集次数。

表 1 聚焦效率与稳定性的比较
Table 1 Comparison of focusing efficiency and stability

名称 实验序列	D_i/mm	驱动聚焦值 V_F					搜索时间 T/s			
		全局搜索	传统爬山	PSA ^[12]	IMSA ^[13]	极值搜索	传统爬山	PSA ^[12]	IMSA ^[13]	极值搜索
1	129	256	255	260	257	258	9.73	8.92	8.74	4.95
2		257	250	264	260	258	9.54	8.03	7.71	5.85
3		256	255	258	258	256	11.9	8.76	8.61	4.77
4		258	255	254	260	260	9.46	8.59	7.64	4.80
5		257	255	255	261 [*]	260	10.35	8.60	8.65	5.31
6	196	228	225	236	231	231	11.6	9.76	8.86	6.31
7		230	230	230	235	230	11.13	8.93	10.31	5.43
8		228	225	226	225	228	10.2	8.92	9.93	5.35
9		230	225 [*]	226	227	230	10.29	9.06	10.37	6.53
10		232	235	234	230	232	10.19	9.79	10.58	6.47
11	217	218	220	213 [*]	217	216	10.19	9.54	10.12	6.04
12		216	220 [*]	217	217	217	9.25	8.44	8.64	6.67
13		216	225 [*]	215	216	216	8.98	9.27	9.50	6.61
14		220	215 [*]	219	221	217	9.00	8.62	9.40	5.76
15		218	220	218	213 [*]	218	9.37	8.74	8.94	5.85
16	321	196	195	200 [*]	199	196	8.98	8.24	9.21	5.59
17		194	190 [*]	198 [*]	195	198	8.85	7.26	9.18	6.57
18		196	190 [*]	198	193	195	10.92	8.25	8.29	5.6
19		198	185 [*]	194 [*]	195	195	9.23	9.23	8.44	5.25
20		196	195	196	193	196	8.22	9.22	8.16	6.17
21	415	190	185 [*]	190	187	187	9.45	9.21	9.25	4.93
22		188	195 [*]	194 [*]	188	190	9.66	9.14	8.62	6.38
23		188	185	186	189	189	8.80	8.07	7.45	5.44
24		190	180 [*]	182 [*]	194 [*]	190	9.58	9.13	8.39	6.29
25		188	180 [*]	184 [*]	190	188	9.28	9.29	8.71	5.26

注:符号“*”表示对应数据因抗干扰能力下降而出现误差时获得的搜索结果; D_i 表示标定卡到相机镜头的距离; V_F 表示搜索到的最佳驱动聚焦值; T 为搜索时间,表示对焦评价函数的计算时间与搜索最佳聚焦位置时间; L_a 表示对焦评价函数值,搜索最佳聚焦位置时对应的图像清晰度值。



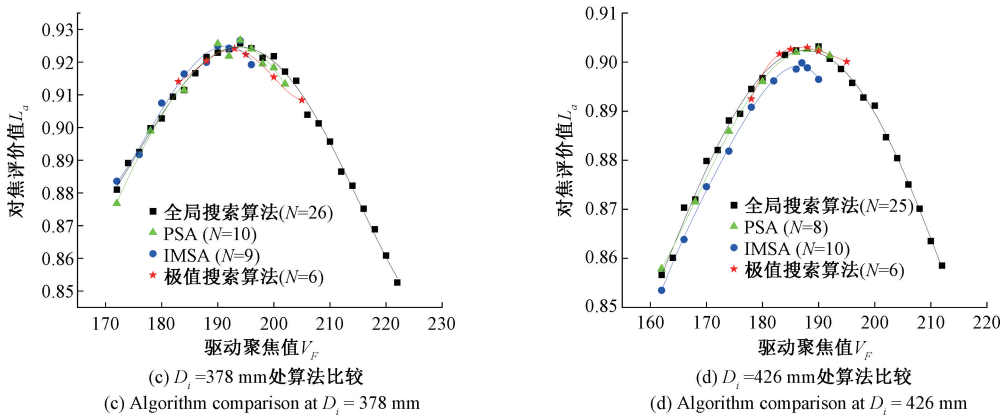


图 3 搜索算法准确性对比
Fig. 3 Comparison of accuracy of search algorithms

表 2 聚焦准确性和清晰程度比较
Table 2 Comparison of focusing accuracy and clarity

名称 实验序列	D_i/mm	全局搜索		PSA ^[12]		IMSA ^[13]		极值搜索	
		V_F	L_a	V_F	L_a	V_F	L_a	V_F	L_a
1	107	296	1. 225 167	294	1. 227 467	295	1. 220 581	296	1. 223 392
2	129	260	1. 219 885	265	1. 218 491	267	1. 217 035	260	1. 217 845
3	153	246	1. 109 131	246	1. 100 135	249	1. 095 354	244	1. 108 584
4	178	240	1. 085 138	238	1. 085 472	239	1. 075 168	240	1. 084 977
5	196	230	1. 088 850	232	1. 086 721	231	1. 086 303	232	1. 084 007
6	217	222	1. 076 727	222	1. 073 721	220	1. 070 747	224	1. 076 562
7	241	216	1. 068 793	214	1. 061 875	217	1. 067 773	216	1. 070 304
8	261	210	1. 040 015	214	1. 034 326	213	1. 035 142	208	1. 037 835
9	283	208	1. 062 407	202	1. 061 718	207	1. 063 803	206	1. 060 341
10	314	200	0. 961 543	200	0. 962 967	199	0. 952 837	199	0. 958 976
11	321	198	0. 968 837	201	0. 969 866	202	0. 944 713	197	0. 970 271
12	378	196	0. 911 756	190	0. 919 954	192	0. 911 864	195	0. 913 600
13	415	191	0. 916 431	190	0. 916 193	187	0. 903 778	189	0. 926 064
14	426	190	0. 902 500	188	0. 902 626	187	0. 897 861	191	0. 913 606
15	537	180	0. 905 409	184	0. 891 210	183	0. 894 689	180	0. 896 496

以上结果表明,以全局搜索算法的清晰度评价值的误差 $|V_{\text{全局}}-V_{\text{极值}}|<0.01$ 为标准,本文算法能够精准确定聚焦位置,具有较高的聚焦准确率和抗干扰能力;相较于其他同类算法,本文算法在精准确定聚焦位置的同时,缩短图像采集次数且将聚焦速度提高了 34.8%。

3.2 聚焦跟踪曲线构造实验结果与分析

为实现在 100~1 000 mm 深度范围内的高清晰度成像,通过相机测距功能获得场景实际参数并依次分割场景深度,从而构造单/多聚焦跟踪曲线。在实验过程中,根据测试的景深深度范围应有不低于 50% 重合的要求,

设定 5 个深度范围进行最佳聚焦位置确定,依次为 100~600 mm,200~700 mm,300~800 mm,400~900 mm,500~1 000 mm。通过聚焦成像实验,获得对应深度范围的景深分割及合焦点距离计算结果,利用曲线拟合方法获得单/多聚焦跟踪曲线,如图 4 所示。

为了确保数据点充分覆盖整个目标场景,实验获取相应的聚焦跟踪曲线坐标点及实现聚焦跟踪曲线的拟合,但不同的曲线构造方法使得聚焦跟踪曲线存在明显差异。如在某聚焦位置上,以目标在 $D_4 = 176$ mm 处为例,在单聚焦跟踪曲线中,此时最佳聚焦位置的驱动聚焦值 $V_{F4} = 231$,则在图中记录坐标点 (176,231);而在多聚

焦跟踪曲线中,此处所匹配的景深区间(D_f^4, D_b^4)为 160~196 mm,在(D_f^4, D_b^4)内成像得到最佳聚焦位置的驱动聚焦值 $V_{F4}=238$,获取坐标点(176,238)。在曲线整体变化趋势上,当 D_i/D_{Fmi} 为 100~150 mm 时,聚焦跟踪曲线的驱动聚焦值整体变化趋势相似,但随着 D_i/D_{Fmi} 的增加,单聚焦曲线由于成像分辨力下降存在明显数值跳动;当 D_i/D_{Fmi} 超过 650 mm 后,单聚焦跟踪曲线的驱动聚焦值的变化规律并不明显,其原因是单聚焦跟踪曲线通过 A 型标定板在不同距离处的平面内进行成像,只对成像景深内的单一平面进行评价,此时相机对标定板的辨识能力减弱,因此无法保证景深跨度的图像清晰度质量。而多聚焦跟踪曲线在标定过程中,B 型标定板上竖直放置小标定板(A1~A5),覆盖深度区间内所有可检测清晰度的范围,优化了成像深度区间的整体清晰度,使得在任何深度处的清晰度都可清晰分辨,驱动聚焦值也随深度规律变化。

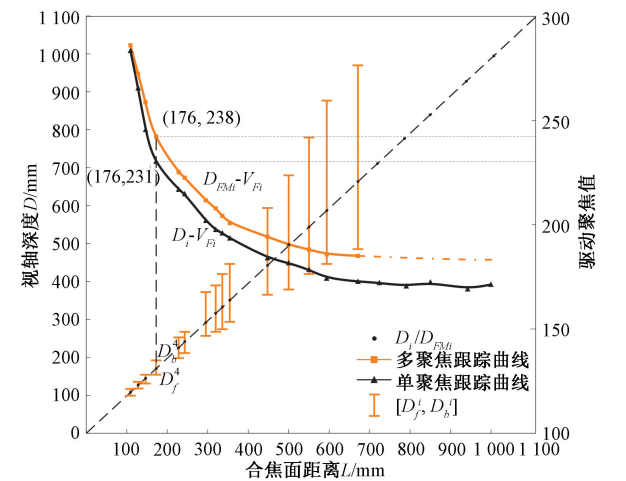


图 4 100~1 000 mm 内景深分割及确定坐标点
Fig. 4 Depth of field segmentation within 100~1 000 mm and determination of coordinate points

3.3 全景深成像效果对比分析

为验证利用聚焦跟踪曲线能够在任意深度处清晰成像,同时比较单/多聚焦跟踪曲线的性能差异。构造非结构化场景,如图 5(a)、(b)所示,在其内表面贴附具有不同特征的图像清晰度测试卡进行实验。以视点 1 和视点 2

为例,进行全景深成像清晰度比较,通过构造的聚焦曲线确定的最佳单/多聚焦位置结果如表 3 所示。利用傅里叶-梅林算法进行图像配准及快速小波融合获得单/多聚焦全景深图像,如图 6(a)~(d)所示。从比较结果可知,单聚焦全景深图像在场景中的近距离聚焦清晰度较高,而在大景深跨度的全景深成像中没有优势,多聚焦全景深图像能够更好的提升深度范围内的全局清晰度,具备更好的表面特征表现力。

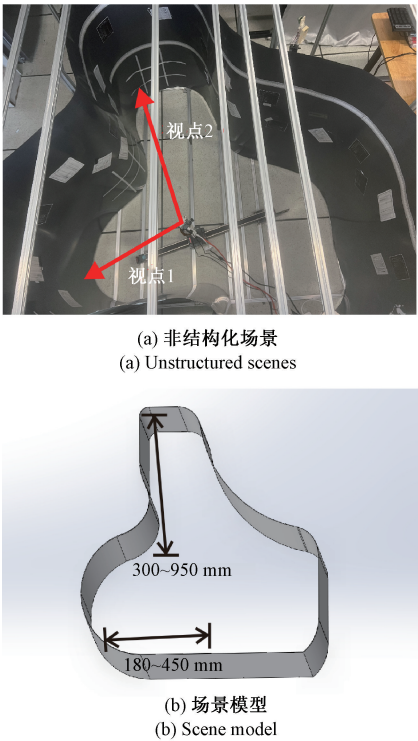


图 5 100~1 000 mm 实验场景
Fig. 5 100~1 000 mm experimental scene

同时,采用能量梯度函数(energy of gradient,EOG)、灰度差绝对值函数(sum of modulus of gray difference,SMD)、Laplace 梯度函数与梯度向量平方函数对单/多聚焦全景深成像效果进行量化评价,如表 4 所示。结果表明,多聚焦全景深图像比单聚焦全景深图像在清晰度量化指标上有所提升,表明其整体清晰度得到改善。根据

表 3 所选深度范围的深度分割及景深匹配结果
Table 3 Depth splitting and depth-of-field matching results for the selected depth range

视点序号	$[d_{fa}, d_{ba}]/\text{mm}$	合焦面序号	景深区间/mm	$(D_i/D_{Fmi})/\text{mm}$	单聚焦位置	多聚焦位置
1	180~450	$i=1$	177~221	197	228	236
		$i=2$	221~297	254	214	213
		$i=3$	297~450	358	196	204
2	300~950	$i=1$	299~455	361	196	203
		$i=2$	455~950	616	176	188

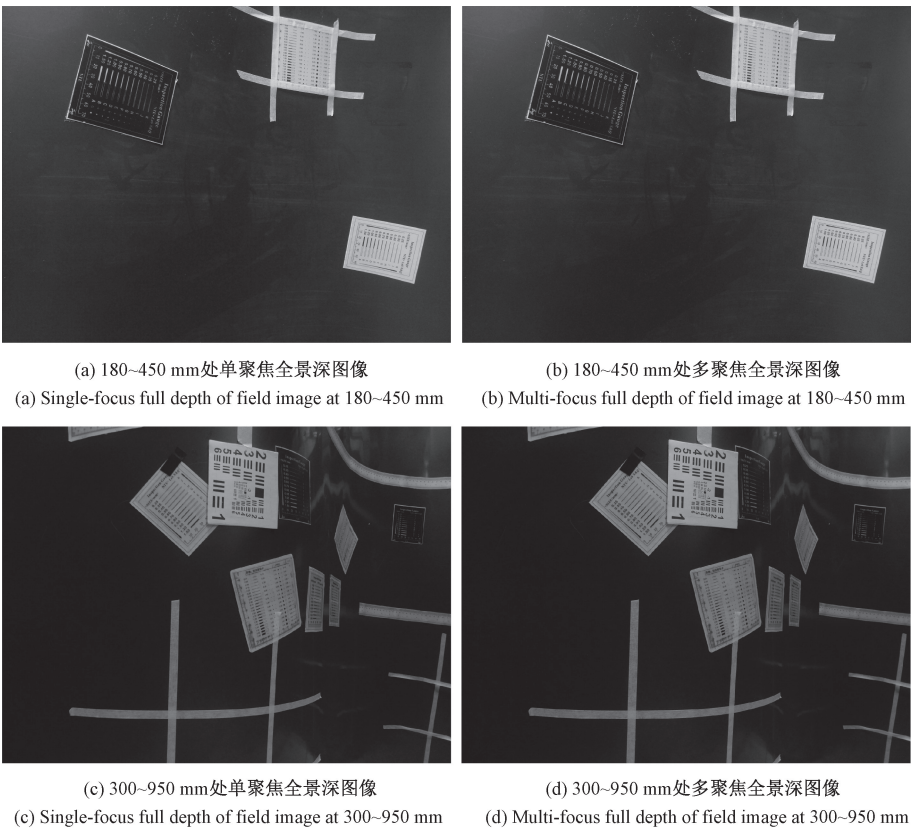


图 6 全景深成像效果对比

Fig. 6 Comparison of full depth of field imaging effects

表 4 清晰度客观评价

Table 4 Objective evaluation of clarity

$[d_{fA}, d_{bA}]/\text{mm}$	180~450		300~950	
	单聚焦	多聚焦	单聚焦	多聚焦
$F_{\text{EOG}}/10^4$	36 983	38 486	28 223	31 069
$F_{\text{SMD}}/10^3$	2 347	2 448	1 835	2 085
$F_{\text{Laplace}}/10^4$	34 229	36 241	15 614	16 281
$F_{\text{梯度向量}}/10^4$	30 047	36 716	25 620	30 354

上述评价结果可知,所提出的聚焦跟踪曲线构造方法提高了聚焦序列图像的清晰分辨程度,并且融合后的全景深图像在大跨度深度区间的整体成像效果具有显著的提升。在单/多聚焦全景深图像的对比中,多聚焦全景深图像高清晰成像分辨力客观评价指标均值提高了 10.35%。综合所得结果以及图像质量评价,所构造的聚焦跟踪曲线可以保证深度范围在 100~1 000 mm 内的清晰表征。

3.4 微小缺陷场景下的成像实验

为验证全景深快速聚焦成像的微小缺陷检出能力,构造非结构化场景内大尺度微小裂纹的成像实验,并利用主观观因素评价了深度范围 180~700 mm 处微小裂纹及清晰度测试卡的单/多聚焦图像的缺陷纹理细节成像质量。

主观评价通过直接观察并比较图像间细节表现力来获得整体清晰度评价结果。利用主观评价变深度非结构化场景内部单/多聚焦成像质量时,可见:单聚焦全景深图像的整体清晰度不足,模糊轮廓且无法展现非结构化场景内表面完整信息及内壁细纹;而多聚焦全景深图像,可清晰分辨宽度小于 0.5 mm 的微小裂纹,并且图像清晰度测试卡清晰可见,如图 7(a)~(c)所示。

同上采用 EOG、SMD、Laplace 梯度函数与梯度向量平方函数进行客观评价。结果表明,多聚焦全景深图像的清晰度量指标上具有显著提升,表明其整体清晰度获得了明显的改善,具体参数如表 5 所示。

表 5 清晰度客观评价

Table 5 Objective Evaluation of Clarity

视点 全景深图像	a		b		c	
	单	多	单	多	单	多
$F_{\text{EOG}}/10^4$	7 578	44 606	13 328	28 814	3 507	9 243
$F_{\text{SMD}}/10^3$	18 588	46 387	19 627	24 181	11 698	18 830
$F_{\text{Laplace}}/10^4$	9 645	51 647	8 216	12 197	4 910	9 486
$F_{\text{梯度向量}}/10^4$	6 885	40 809	12 781	27 935	3 198	8 554

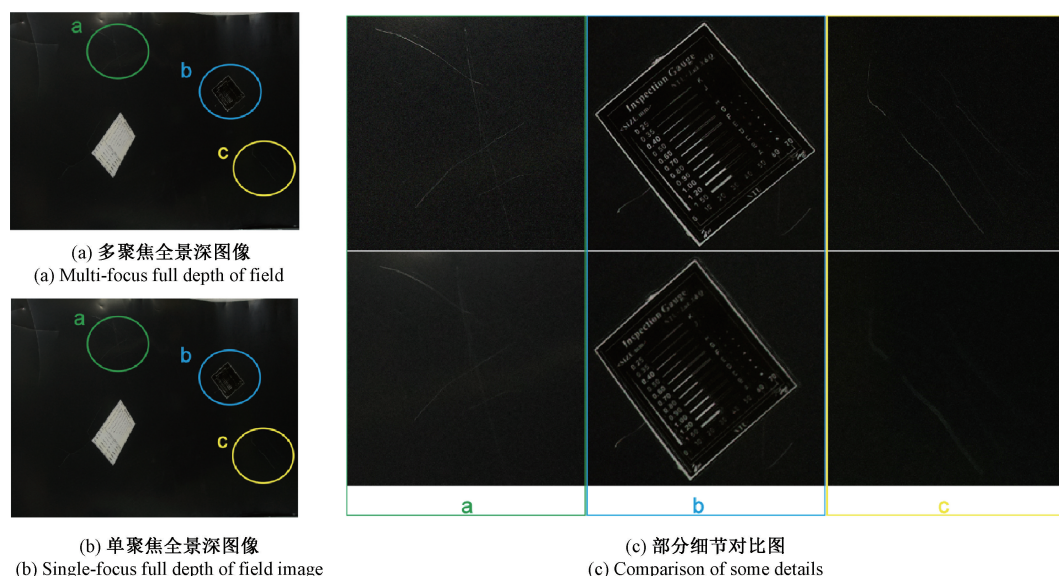


图7 微小缺陷的成像效果对比

Fig. 7 Comparison of imaging results of minor defects

综合主观评价与客观评价,所提方法在非结构化场景内的缺陷检测具有显著的成像效果,能够满足在 100~1 000 mm 内跨度下对 0.5 mm 裂纹的明确分辨。

4 结 论

本文针对非结构化场景内部大跨度景深变化的特点,基于测距-聚焦相机,提出了基于极值搜索算法的聚焦跟踪曲线快速构造法。根据景深特性,通过测距建立物距与聚焦位置的关系,提出聚焦跟踪曲线构造原理;为验证聚焦跟踪方法所提出的快速准确聚焦要求,提出了具有快速、准确、稳定特性的极值搜索算法,开展实验,并与同类算法比较其准确性、稳定性及快速聚焦能力;利用上述实验方法构造聚焦跟踪曲线,设计单/多聚焦曲线构造方式,分析构造方式对图像清晰度的影响,并在非结构化场景中展开了全景深成像效果实验。实验结果表明,所提算法能够准确搜索到最佳聚焦位置,具有较高的聚焦准确率和抗干扰能力;相较于其他同类算法,本文算法在确定聚焦位置的同时,缩短图像采集次数且将聚焦速度提高了 34.8%;所构造的聚焦跟踪曲线能够快速准确的获取聚焦序列图像,将其融合后得到的全景深图像在大范围深度变化中能够展现出整体高清晰的成像效果;相较于单聚焦全景深图像,多聚焦全景深图像能够更好的提升深度范围内的全局清晰度,具备更好的表面特征表现力;能够满足在 100~1 000 mm 内跨度下对 0.5 mm 裂纹的明确分辨。本方法具有全景深成像快速稳定、清晰度高等特点,为在非结构化场景中的全景深成像、微小缺陷检测

提供了可行的解决方案,具有较广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 赵朗月, 吴一全. 基于机器视觉的表面缺陷检测方法研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 198-219.
ZHAO L Y, WU Y Q. Research progress of surface defect detection methods based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 198-219.
- [2] 黄河峡, 孙姝, 于航, 等. 亚声速 S 弯进气道研究的新进展[J]. 推进技术, 2020, 41(12): 2641-2658.
HUANG H X, SUN SH, YU H, et al. Recent progress in subsonic S-shaped inlets [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(12): 2641-2658.
- [3] 朱嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1297-1303.
ZHU J, LI X F, XU Y X. Camera calibration technique based on active vision [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1297-1303.
- [4] 夏浩盛, 余飞鸿. 数码显微镜自动对焦算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 21-28.
XIA H SH, YU F H. Auto focusing algorithm of digital microscope [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 21-28.
- [5] TANG M, LIU CH, WANG X P. Autofocusing and image fusion for multi-focus plankton imaging by digital holographic microscopy [J]. Applied Optics, 2020, 59(2): 333-345.

- [6] 江旻珊, 张楠楠, 张学典, 等. 混合搜索法在显微镜自动对焦中的应用[J]. 光电工程, 2017, 44(7): 685-694, 749.
- JIANG M SH, ZHANG N N, ZHANG X D, et al. Applications of hybrid search strategy in microscope autofocus [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(7): 685-694, 749.
- [7] 刘剑, 马骏驰, 于鹏, 等. 基于图像聚焦定位的 AFM 自动逼近方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 58-67.
- LIU J, MA J CH, YU P, et al. Research on auto-feeding approach of AFM based on image autofocus[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 58-67.
- [8] WANG C, HUANG Q, CHENG M, et al. Deep learning for camera autofocus [J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2021, 7: 258-271.
- [9] 何帆, 王少志, 徐晓文, 等. 一种基于清晰域的自动聚焦算法[J]. 光电子·激光, 2021, 32(1): 25-34.
- HE F, WANG SH ZH, XU X W, et al. An auto-focusing algorithm based on clear domain [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2021, 32(1): 25-34.
- [10] SELEK M. A new autofocusing method based on brightness and contrast for color cameras [J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2016, 16(4): 39-44.
- [11] 冯华君. 主动式 PSD 自动对焦光学系统设计[J]. 光学仪器, 1998, 20(1): 13-17.
- FENG H J. Optical design of initiative PSD auto-focus system[J]. Optical Instruments, 1998, 20(1): 13-17.
- [12] 吴洪妍, 孙玉鑫, 于秋阳, 等. 基于分区搜索算法的快速聚焦策略研究[J]. 光学技术, 2023, 49(2): 245-249.
- WU H Y, SUN Y X, YU Q Y, et al. Research on fast auto-focus using strategy based on partition search algorithm[J]. Optical Technique, 2023, 49(2): 245-249.
- [13] JIA D Y, ZHANG CH W, WU N K, et al. Autofocus algorithm using optimized Laplace evaluation function and enhanced mountain climbing search algorithm [J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(7): 10299-10311.
- [14] 尤玉虎, 刘通, 刘佳文. 基于图像处理的自动对焦技术综述[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 132-136.
- YU Y H, LIU T, LIU J W. Survey of the auto-focus methods based on image processing [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2): 132-136.
- [15] 王爽杰, 邢强, 王周义, 等. 异形管道内跨模式全景深成像方法与装置[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 54-64.
- WANG SH J, XING Q, WANG ZH Y, et al. Method and device for cross-mode full depth of field imaging in an irregular pipe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 54-64.
- [16] 冯鑫, 胡开群, 袁毅, 等. 基于超分辨率和组稀疏表示的多聚焦图像融合[J]. 光子学报, 2019, 48(7): 96-107.
- FENG X, HU K Q, YUAN Y, et al. Multi-focus image fusion based on super-resolution and group sparse representation [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(7): 96-107.
- [17] 王青青, 陈平. 基于多聚焦图像序列融合的筒状类工件内壁形貌重构方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 46-53.
- WANG Q Q, CHEN P. Reconstruction method for inner wall morphology of cylindrical workpiece based on multi-focus image sequence fusion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 46-53.
- [18] 魏利胜, 张平政. 基于分层模型与局部复原的多聚焦图像融合方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 161-169.
- WEI L SH, ZHANG P G. Multi-focus image fusing method based on hierarchical model and partial recovery[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 161-169.
- [19] KIM Y, LEE J S, MORALES A W, et al. A video camera system with enhanced zoom tracking and auto white balance [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2002, 48(3): 428-434.
- [20] HOAD P, ILLINGWORTH J. Automatic control of camera pan, zoom and focus for improving object recognition[C]. Fifth International Conference on Image Processing and its Applications, 1995: 291-295.
- [21] LEE J S, KO S J, KIM Y, et al. A video camera system with adaptive zoom tracking[J]. International Conference on Consumer Electronics, 2002: 56-57.
- [22] PEDDIGARI V, KEHTARNAVAZ N, LEE S Y, et al. Real-time implementation of zoom tracking on TI DM processor [J]. Real-Time Imaging IX, 2005, 5671: 8-18.

[23] PEDDIGARI V, KEHTARNAVAZ N. A relational approach to zoom tracking for digital still cameras[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(4): 1051-1059.

[24] PEDDIGARI V, KEHTARNAVAZ N. Real-time predictive zoom tracking for digital still cameras[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2007, 2(1): 45-54.

[25] ZOU T Y, TANG X Q, SONG B, et al. Robust feedback zoom tracking for digital video surveillance[J]. Sensors, 2012, 12(6): 8073-8099.

作者简介



魏浩东,2022 年于常州大学获得学士学位,现为南通大学硕士研究生,主要研究方向为视觉感知与检测。

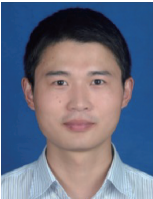
E-mail: 17851072386@163.com



王周义,2005 年于江南大学获得学士学位,2009 年于南京航空航天大学获得硕士学位,2015 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京航空航天大学副研究员,主要研究方向为运动力学和仿生黏附。

E-mail:wzyxml@nuaa.edu.cn

Wang Zhouyi received his B.Sc. degree from Jiangnan University in 2005, received his M.Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2009, and received his Ph.D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2015. He is currently an associate research fellow at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include movement mechanics and the bionic adhesion.



邢强(通信作者),2007 年于南京航空航天大学获得学士学位,2010 年于南京航空航天大学获得硕士学位,2014 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南通大学副教授,主要研究方向为仿生视觉感知与智能系

统研究。

E-mail: meexq@ntu.edu.cn

Xing Qiang (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2007, received his M.Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2010, and received his Ph.D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2014. He is currently an associate professor at Nantong University. His main research interests include bionic visual perception and Intelligent system research.