

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209455

异形管道内跨模式全景深成像方法与装置^{*}

王爽杰¹, 邢 强¹, 王周义^{2,3}, 徐海黎¹, 戴振东²

(1. 南通大学机械工程学院 南通 226019; 2. 南京航空航天大学机电学院 南京 210016;
3. 南京航空航天大学深圳研究院 深圳 518063)

摘 要:异形管道在特种行业中具有极为重要的作用,对其内表面细微缺陷进行检测时所面临的空间小、径向尺寸变化自由等结构特征,使得传统管道内成像检测方式面临着因连续成像景深尺度变化大而造成的失焦问题,影响系统的高分辨率成像。针对这一问题,提出了跨模式全景深成像方法:通过融合成像表面深度数据与成像系统参数数据,自适应的决策当前的聚焦模式,并输出相应的合焦面深度集合。研制了具备深度感知的跨模式成像装置,并针对异形管道内壁细纹特征进行了成像实验。实验结果表明:本成像装置能够自适应的获取单聚焦图像或叠焦序列图像;对叠焦序列图像进行小波多聚焦融合,可获取全景深图像;所获取的全景深图像能够在40~1 000 mm内分辨出0.5 mm宽微小细纹。本成像方法及装置能够为异型管道等场景内的缺陷检测及损伤分析提供可靠的图像支撑。

关键词:异形管道;全景深;跨模式;自由曲面;多聚焦融合

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

Method and device for cross-mode full depth of field imaging in an irregular pipe

Wang Shuangjie¹, Xing Qiang¹, Wang Zhouyi^{2,3}, Xu Haili¹, Dai Zhendong²

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
3. Shenzhen Research Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Shenzhen 518063, China)

Abstract: Irregular pipes play an extremely important role in special industries. The detection of subtle defects on their inner surface faces structural characteristics, such as small space and free change of radial size, which makes the traditional in-pipeline imaging detection method has the problem of out-of-focus caused by the large change of depth of field scale when imaging in succession, and affects the system's high-resolution imaging. To solve this problem, a method for the cross-mode full depth of field imaging is proposed, which is by focusing the imaging surface depth data and imaging system parameter data. The current focus mode is determined adaptively, and the corresponding aggregate of the focal plane depth data will be output. A radial cross-mode imaging device with a depth-sensing function is developed, and an imaging experiment is implemented for the features of fine lines in the inner wall of an irregular pipe. Results show that the designed imaging device can obtain the single focus image or fold focal sequence images adaptively, a multi-focus fusion operation in the wavelet domain is performed on the stacked sequence images to obtain the full depth of field image, and the obtained full depth of field image can distinguish tiny fine lines with a width of 0.5 mm under the condition of a 40~1 000 mm depth span. The method and device can provide reliable image support for defect detection and damage analysis of irregular pipes and other similar scenes.

Keywords: irregular pipe; full depth of field; cross-mode imaging; free-form surface; multi-focus fusion

收稿日期: 2022-03-17 Received Date: 2022-03-17

^{*} 基金项目: 军委基础加强计划(2019-JCJQ-ZD-356)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX21_3080)、深圳基础研究专项(自然科学基金)(JCY20210324122812033)资助

0 引言

异形管道是一种由自由曲面所构成的特殊设备,在特种行业中具有极为重要的作用^[1],其内表面细微缺陷对管道性能和结构强度均有很大影响,对其内表面诸如凹坑、涂层脱落、细微裂痕等缺陷的快速检测,是确保设备安全、高效运行等的重要保障。图像检测具有精度高、设备小、结果清晰、检测速度快等特点^[2-3],是常规管道内表面微小缺陷检测的有效手段。但由于异形管道的空间狭小且具有独特型线及变截面特性^[4],导致管道内在径向与轴向产生连续不规则变化。传统成像方式仅能工作在简单的单聚焦模式或多聚焦模式^[5]中的单一模式下,无法适应异形管道内径向大跨度景深变化,易产生景深不匹配问题;又由于管道内少纹理、弱光照环境,基于图像处理的被动式自动对焦技术易产生失焦问题^[6]。这就要求在异形管道内的图像采集系统具有跨模式、自适应、精准快速聚焦的全景深成像能力。

现有的研究中,“轴向成像”与“径向成像”是管道内成像的两种主要方式。“轴向成像”是将成像装置以视轴沿管道轴向摆放进行单视点成像,如管道闭路电视相机成像^[7-8]、鱼镜头相机成像^[9-10]、单反射管道相机成像^[11-12]、折反射全景环形透镜相机成像^[13-14]与全方位视觉传感器成像^[15-16]等。由于轴向单视点成像速度快、环形图像全景展开效果好因而“轴向成像”获得了较快发展。然而,“轴向成像”下管道内表面在所成图像上的映射关系都表现为规则对称的圆环图像,且随着轴向深度的增加,图像畸变、分辨率分布各不相同^[17],管道内圆环图像的展开效果依赖于管道的规则性、视轴与管道轴线的重合程度以及展开过程的畸变矫正算法^[2,11,18-19],任何管道形貌的突然变化以及视轴偏移都可能造成图像展开效果的急剧下降,特别是鱼镜头所造成的径向桶形畸变往往难以完全矫正^[20-21]。由于异形管道普遍具有非对称性,使得其所成不可预测的圆环图像无法正常展开。同时大视场角的轴向全景成像装置所用到的鱼镜头、折反射镜等制做困难,畸变矫正也较为复杂,这对通过在异形管道内进行“轴向成像”进行缺陷检测提出了严峻挑战。“径向成像”是将成像装置以视轴沿管道径向方向摆放,通过多视点成像的方式获取包含管道内表面完整信息的环形图像序列,并通过拼接的方式得到管道内全景图^[22-23]。相似条件下多视点融合方案具备更高的分辨率而不需要复杂的畸变校正与镜头制备,是异型管道内成像的有效手段。然而,虽然“径向成像”下可以通过更换镜头适配不同半径尺寸的管道,但单一焦距镜头的景深无法应对不同径向角度下大跨度深度变化。

如何拓展成像系统景深是异形管道内径向高分辨力成像的关键。已有的景深拓展方法中,波前编码技术^[24-26]、特殊平板镜头^[27]、光场相机^[28-29]等以显著降低图像空间分辨率为代价,不适合于对微小缺陷的检测;配备多焦段镜头的多相机融合方案^[30]能够解决大成像深度下的大景深问题,但设备体积大,系统复杂,且对于异形管道空间这种小空间大深度跨度的场景,长焦镜头的作用并不显著;基于多聚焦图像融合的叠焦法对不同焦平面分别成像,并对叠焦序列图像进行融合以实现景深拓展^[31-33],是一种高效且被广泛采用的景深拓展方法,但传统该方法是在一定焦深范围内对成像表面逐层聚焦成像,不具有自适应性,成像效率低,且聚焦效果依赖于离焦分析算法等被动对焦算法,对异型管道内少纹理、弱光照特点适应性差;而基于测距法的主动对焦法不受光照与纹理影响,但现有的研究仅聚焦于单一主体或焦平面,不具有全景深多聚焦能力,在多聚焦成像模式下易因景深不匹配而效果不佳^[34]。

因此,如何解决径向成像过程中的景深不匹配问题,并能够根据异形管道径向轮廓的深度分布与变化快速地进行自适应聚焦成像,是解决异形管道中径向高清晰全景深成像的关键。据此,本文提出异型管道内径向跨模式全景深成像方法:通过融合管道径向深度分布数据与成像装置成像参数感知成像的景深模式;之后,根据不同的景深模式制定最优的聚焦方案。利用该成像方法研制具有深度感知能力的跨模式成像装置,对异形管道模型进行径向大深度跨度条件下的细纹成像实验,并获得管道内表面全景图。从而解决由于大深度跨度所造成的传统成像装置径向成像适应性下降及景深不足等问题。

1 理论与方法

1.1 相机景深特性与聚焦原理

景深是指相机焦点平面前后两个最小允许弥散圆之间使成像相对清晰的范围,而景深描述合焦面前后使成像相对清晰的范围,是反映相机成像效果的重要特性,景深原理示意如图1所示。

根据小孔成像原理,相机景深特性由允许弥散圆直径 δ 、镜头焦距 f 与镜头的光圈值 F 决定,具体可通过前景深、后景深公式进行表征:

$$\begin{cases} \Delta L_f = \frac{F \times \delta \times L^2}{f^2 + F \times \delta \times L} \\ \Delta L_b = \frac{F \times \delta \times L^2}{f^2 - F \times \delta \times L} \end{cases} \quad (1)$$

其中,如图1所示, ΔL_f 表示前景深, ΔL_b 表示后景深, L 表示合焦面到感光元件的拍摄距离, δ 是根据清晰度需求设置的超参数,一般选取1~ n 个感光元件像素尺

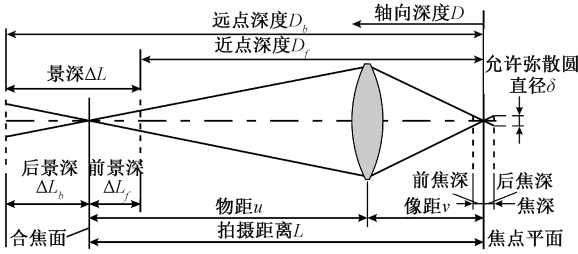


图1 景深原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram for depth of field principle

寸。本文中,为更好的表现前、后景随合焦面距离 L 的规律,令:

$$\begin{cases} D_f(L) = L - \Delta L_f = L - \frac{F \times \delta \times L^2}{f^2 + F \times \delta \times L} \\ D_b(L) = L + \Delta L_b = L + \frac{F \times \delta \times L^2}{f^2 - F \times \delta \times L} \end{cases} \quad (2)$$

其中,定义 $D_f(L)$ 为景深近点深度函数, $D_b(L)$ 为景深远点深度函数。

要使不同深度的合焦面都能够清晰成像,还需通过聚焦使合焦面处于一定的景深之中,由高斯成像(式(3))可知,对于定焦的小孔成像系统,需通过移动镜头改变像距 v 进行聚焦,此时,像距 v 的改变使得不同物距 u 条件下对应的景深 ΔL 内的物体均能清晰成像。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (3)$$

1.2 跨模式全景深成像方法

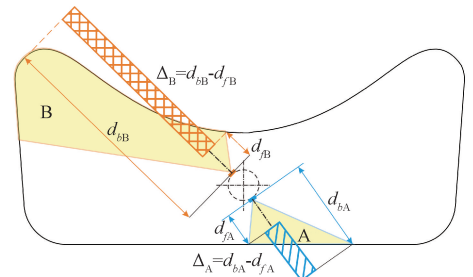
异型管道内表面到各自径向截面的几何形心距离跨度大,不同视点成像时景深差异较大。在面对不同景深的管道表面时,单一的单聚焦成像模式或多聚焦融合成像模式均不能很好的匹配合适景深,如图 2(a) 视点 A、B 所示。其中, d_{fX} 、 d_{bX} 分别表示视点 $X(X=A, B)$ 内目标近点深度与目标远点深度,深度跨度 $\Delta_X = d_{bX} - d_{fX}$ 即为视点 X 所需成像景深。根据相机景深及聚焦原理,要实现该异型管道内表面区域的高质量成像,不同深度跨度 Δ_X 的管道表面均应有对应的处于深度区间 (d_{fX}, d_{bX}) 的合焦面进行成像;但在成像视野范围内,不同视点 X 条件下深度区间 (d_{fX}, d_{bX}) 区别较大时,具有单一景深模式的相机无法适用。因此,提出一种根据深度分布情况进行的跨模式成像方法。

如图 2(b) 所示,相机通过视点 A 进行成像时,其视野内目标处于深度 (d_{fA}, d_{bA}) 范围内,目标的近点深度 $D = d_{fA}$ 与景深近点深度函数曲线 $D_f(L)$ 相交于点 $N_A(D_f^{-1}(d_{fA}), d_{fA})$, 远点深度 $D = d_{bA}$ 与景深远点深度函数曲线 $D_b(L)$ 相交于点 $M_A(D_b^{-1}(d_{bA}), d_{bA})$, 并且,有

$D_f^{-1}(d_{fA}) \geq D_b^{-1}(d_{bA})$ 。定义合焦面深度函数 $D_{\text{合}}(L) = L$, 则在深度区间 (d_{fA}, d_{bA}) 内若存在相应的合焦面深度位置 $D_{\text{合}}(L_F) = L_F$, 使得 $(d_{fA}, d_{bA}) \subseteq (D_f(L_F), D_b(L_F))$, 那么此时取该合焦面距离 $L_F \in (D_b^{-1}(d_{bA}), D_f^{-1}(d_{fA}))$ 即可实现该深度范围内的聚焦成像。即当能满足条件: $D_f^{-1}(d_{fA}) \geq D_b^{-1}(d_{bA})$ 时,有单聚焦模式下的中间深度聚焦法:

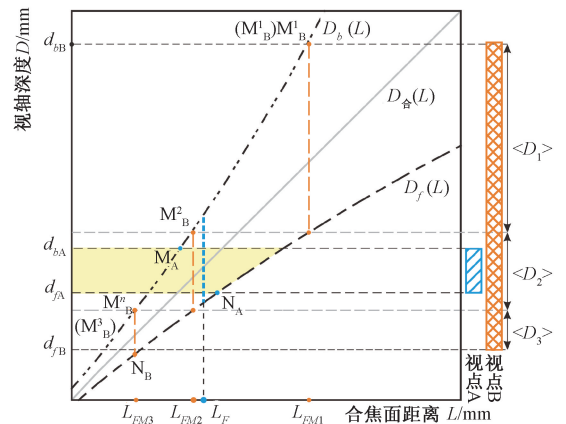
$$D_{F\text{single}}(d_{fA}, d_{bA}) = \frac{d_f^{-1}(d_{fA}) + D_b^{-1}(d_{bA})}{2} \quad (4)$$

其中, $D_{F\text{single}}(d_{fA}, d_{bA})$ 为深度范围在 (d_{fA}, d_{bA}) 时的单聚焦合焦面深度。



(a) 异形管道内径向成像模式示意

(a) Schematic diagram of radial imaging mode in the irregular pipe



(b) 跨模式混合聚焦原理

(b) Principle of hybrid focusing by cross-mode

图2 跨模式全景深成像方法

Fig. 2 Method for cross-mode full depth of field imaging

相应地,当需要从视点 B 进行成像时,其视野内目标处于深度范围 (d_{fB}, d_{bB}) 内,当采用式(4)的方式进行聚焦成像时,难以在 (d_{fB}, d_{bB}) 内找到对应的合焦面进行一次成像,此时需要多次分段聚焦。即成像目标深度范围不被当前景深的深度范围所完全包含时,需要对 (d_{fB}, d_{bB}) 进行深度分割并匹配景深后成像。对于落入多聚焦成像区域的成像目标,需满足以下两个条件:1) 分割后的成像目标深度范围能够被完整覆盖,2) 且使得

分割次数 n 最少,即:

$$\begin{cases} (<D_1> \cup <D_2> \cup \dots \cup <D_n>) \cap \\ (d_{fB}, d_{bB}) = (d_{fB}, d_{bB}) \\ n = N_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

其中,“ $<D_n>$ ”定义为对成像目标深度分割后每份管道深度的范围, N 为所需要分割的次数($N_{\min}$ 为其最小值)。

在图 2 中,多聚焦模式以视点 B 为例。 $D = d_{fB}$ 与 $D_f(L)$ 相交于点 $N_B(D_f^{-1}(d_{fB}), d_{fB})$, $D = d_{bB}$ 与 $D_b(L)$ 相交于点 $M_B(D_b^{-1}(d_{bB}), d_{bB})$, 并且有 $D_f^{-1}(d_{fB}) < D_b^{-1}(d_{bB})$ 。如图 2(b) 所示,分别以点 M_B^i (其中 $i = 1, 2, \dots, n$, 图 2(b) 中 $n = 3$) 横坐标寻找对应于 $<D_i>$ 的合焦面深度 $D_{Fi}(L_{FMi})$, 直至 $D_f(D_{FMn}) \leq d_{fB}$ 。那么此时,对于视点 B 下 (d_{fB}, d_{bB}) , 当 $D_f^{-1}(d_{fB}) < D_b^{-1}(d_{bB})$ 则有多聚焦模式下的阶梯下落叠焦法 $\{D_{Fmulti}(d_{fB}, d_{bB})\} = \{D_{FM1}, D_{FM2}, \dots, D_{FMi}\}$ 。

$$D_{FMi} = \begin{cases} D_b^{-1}(d_{bB}), & i = 1 \\ D_b^{-1}(D_f(D_{FM(i-1)})), & D_f(D_{FM(i-1)}) > d_{fB} \end{cases} \quad (6)$$

其中, D_{FMi} 表示多聚焦成像时对应于 $<D_i>$ 的各合焦面深度,且 $D_{FMi} = D_{Fi}(L_{FMi}) = L_{FMi}$ 。在本文中,将 (d_f, d_b) 分割为 $\{<D_1>, <D_2>, \dots, <D_n>\}$ 的过程称为深度分割,计算出与 $\{<D_1>, <D_2>, \dots, <D_n>\}$ 匹配的 $\{D_{FM1}, D_{FM2}, \dots, D_{FMn}\}$ 的过程称为景深匹配。

据此,本文针对异形管道内径向深度跨度大的特点,提出了一种跨模式的自适应混合聚焦全景深成像方法,如式(7)所示。

$$\{D_F(d_f, d_b)\} = \begin{cases} \{D_{Fsingle}(d_f, d_b)\}, & D_f^{-1}(d_f) \geq D_b^{-1}(d_b) \\ \{D_{Fmulti}(d_f, d_b)\}, & D_f^{-1}(d_f) < D_b^{-1}(d_b) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\{D_F(d_f, d_b)\}$ 即为对 (d_f, d_b) 深度区间解算后的合焦面深度位置的集合,通过对该集合中合焦面分别成像,可以获取当前视野内全景深序列图像。

1.3 跨模式全景深成像装置的实现方法

利用所提跨模式全景深成像方法进行成像的工作流程如图 3 所示。图 3 中深度感知是自适应深度分割的重要前提与基础,其作用是获取当前管道深度分布数据以提取当前视野内管道内壁深度分布区间 (d_f, d_b) 。负责深度感知的传感装置应具有与成像镜头匹配的视场角 (field of view, FOV)、面阵深度数据获取能力、较小的体积以及不干扰相机工作的属性。

空间分辨率是衡量成像系统对细微缺陷分辨能力的重要性能参数,文献[10]提出了小孔成像相机应用于管道轴向成像的深度空间分辨率,与之对应的,径向成像的

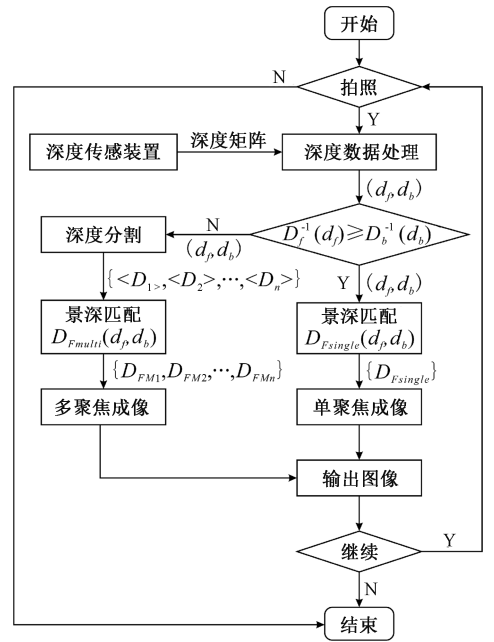


图 3 跨模式聚焦成像流程

Fig. 3 Flow of focusing imaging by cross-mode

空间分辨率 R_{space} 可以描述为:

$$R_{space} = \frac{f}{l} = \frac{size_{pixel}}{size_{obj}} \quad (8)$$

其中, f 为焦距, $l \approx L$, $size_{pixel}$ 为占据的感光元件像素尺寸, $size_{obj}$ 为缺陷对象最小宽度尺寸。在径向成像的管道检测中,为保证对细微缺陷的成像能力,所要求的 $size_{obj}$ 在感光元件中应满足占据至少一个像素尺寸,从而保证对细纹的成像质量。

2 实验验证

2.1 成像装置的研制

为实现所提成像方法,根据 1.3 节的装置设计要求研制了跨模式全景深成像装置。首先根据异形管道内对径向极限 1 000 mm 处 0.5 mm 宽细纹高分辨力成像的性能要求,选取 SONY 公司 IMX477 作为感光成像元件,其像素尺寸 $1.55 \mu\text{m} \times 1.55 \mu\text{m}$,根据式(7)计算选取焦距 $f = 3.9 \text{ mm}$,光圈值 $F = 2.8$,FOV = $75^\circ \times 52^\circ$ 的镜头,其聚焦范围为 $(40 \text{ mm}, \infty)$ 。

其次,选取 ST 公司基于飞行时间原理 (time of flight, TOF) 的超微型面阵深度传感器来获取管道深度分布数据,并通过将两只传感器按照如图 4 中 m2 所示的一定角度布置以获得分辨率 8×13 , FOV = $75^\circ \times 45^\circ$ 的深度传感模块,其具有 4 000 mm 探测深度且体积极小,同时工作波长为 930 nm,不影响相机成像。此外,为确保对微小裂纹的成像质量,选取 $\delta = 3.1 \mu\text{m}$ 。

2.2 单视点自适应混合聚焦成像实验

为测试所研制成像装置对微小缺陷的实际分辨能力,如图 4 中 m0 所示,对 S 弯异型进气道进行了仿真建模,并根据模型某截面轴向 1 200 mm 的深度范围制作了如图 4 的异型管道模拟环境,并在其内表面贴附具有不同宽度细纹特征的“外观检查等级菲林”卡片以分析成像质量。将前述设计的单视点成像装置安置在微调直线滑台上,调整相机所在基圆直径为 150 mm,并固定在步进转盘上,以 45°/视点进行全景序列成像,并获得①~⑧视点下的单聚焦或叠焦序列图像。

图 4 中视点①~⑧中每一角度所对应的深度范围(range of depth, RoD)与所获得的序列图像数量(number of multi-focus image, NMI)如表 1 所示。特别的,视点①与视点②获得的管道深度数据及其跨模式聚焦成像序列的实验结果如图 5、6 所示。其中,视点①的深度分割及景深匹配结果如表 2 所示,根据景深条件分别在深度为

726、468 以及 352 mm 处进行了 3 次聚焦成像;视点②只需选择合适的合焦面深度即可一次清晰成像。结果表明,面对不同的深度分布情况,研发的装置可以实现自适应执行单聚焦模式或多聚焦模式的成像方案。

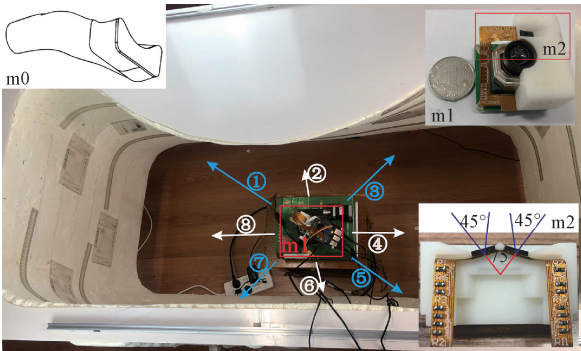
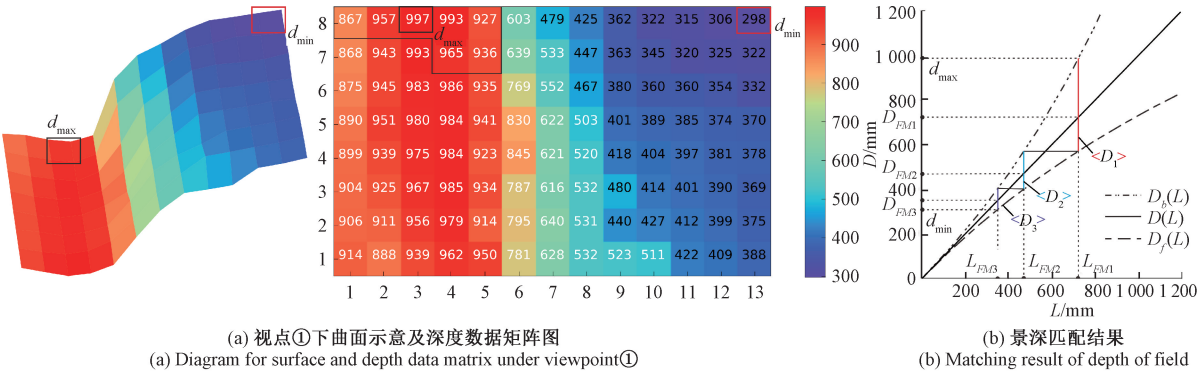


图 4 实验场景
Fig. 4 Experimental scene

表 1 视点深度及成像统计表
Table 1 Depth and imaging statistics of multi-viewpoint

统计指标	视点①	视点②	视点③	视点④	视点⑤	视点⑥	视点⑦	视点⑧
RoD/mm	298~997	272~355	305~1 004	352~835	247~985	228~256	242~993	348~841
NMI/张	3	1	3	2	4	1	4	2



(c) 基于景深匹配结果的多聚焦序列图像
(c) Multi-focus sequential images based on matching result of depth of field

图 5 视点①下多聚焦实验
Fig. 5 Experiment of multi-focus imaging under viewpoint ①

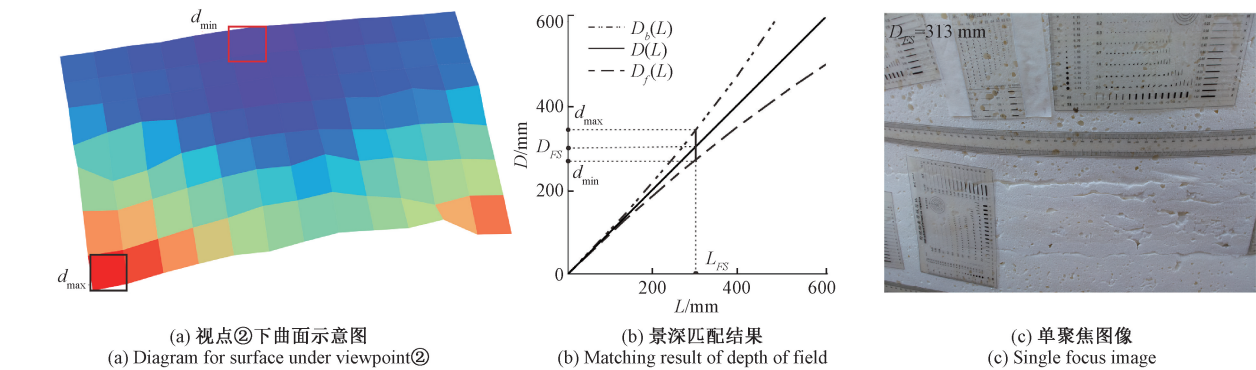


图 6 视点②下单聚焦实验

Fig. 6 Experiment of single focus imaging under viewpoint ②

表 2 深度分割及景深匹配结果

Table 2 Results of depth segmentation and depth of field matching

合焦面序号	深度分割范围 ($<D_i>/\text{mm}$)	合焦面深度 (D_{FMi}/mm)
$i=1$	586~997	726
$i=2$	405~586	468
$i=3$	298~405	352

2.3 叠焦图像景深拓展实验

对视点①~⑧中多聚焦情况下所获取的叠焦图像利用傅里叶-梅林算法^[35]进行图像配准,采用文献[36]中的快速小波融合算法进行了多聚焦融合实验并获取全景深图像,其中视点①的多聚焦融合情况如图 7 所示。 FMi^{V1} ($i=1,2,3$) 为对在合焦面 FMi 处成像的图像进行小波分解后垂直方向(V1)的高频子带图像。

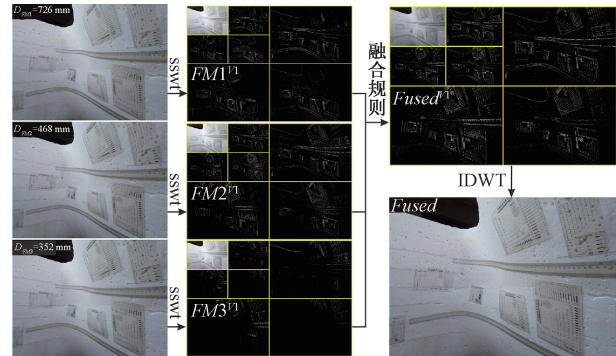


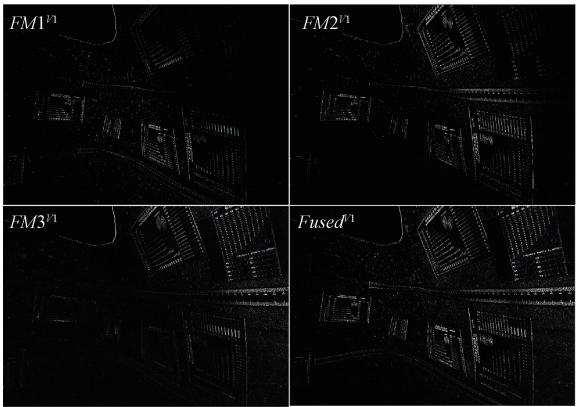
图 7 视点①小波融合过程

Fig. 7 Wavelet fusion process of viewpoint ①

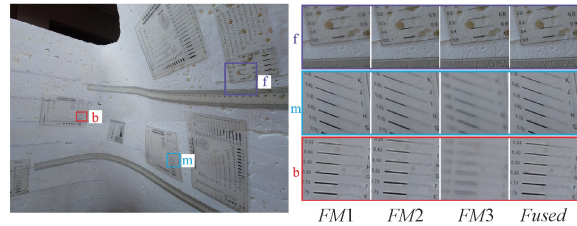
2.4 全景深融合成像效果评价

全景深融合后的图像应比融合前的单一图像具备更好的表面特征表现力,主要表现为全局清晰度的提升。本文将从主观评价与客观评价两个维度分别对频域和空域两个方面全景深融合成像效果进行评价。

频域主观评价通过比较小波融合前后高频子带图像的高频特征的表现来评价成像序列的信息获取完整性与融合质量。如图 8(a)所示高频特征表现为子带图像中的清晰纹理,是高质量表面特征的重要表征形式,有助于缺陷的检测。具有全景深高分辨力的图像,其高频特征应不局限于特定深度表面,而是分布于图像中所有深度表面。在图 8(a)中,当合焦面 FMi ($i=1,2,3$) 不同时,通过比较 FMi^{V1} 可以发现,融合前管道表面只有部分深度区域具有明显的高频特征,且高频特征区域具有明显且连续的差异,而融合后的高频子带图像($Fused^{V1}$)则具有全局高频特征,说明所获取的多聚焦图像序列有效获取



(a) V1 方向高频子带对比
(a) Comparison of high frequency subband in V1 direction



(b) 空域效果对比
(b) Comparison of effect in spatial domain

图 8 主观效果对比

Fig. 8 Comparison of subjective effect

了管道内表面整体信息,同时融合后的图像整体清晰度获得了提升。

空域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。如图 8(b)所示,在空域中分别对聚焦于合焦面 $FMi(i=1,2,3)$ 图像中的 b、m、f 区域的细节信息进行了主观比较。可以发现,在面对视点①中(298 mm, 997 mm)深度范围的异型管道内壁时,融合后的图像(*Fused*)仍然可以分辨出最远 997 mm 左右 b 处 0.5 mm 宽的细条纹,说明本成像装置在有效获取了管道各深度表面的信息并在多聚焦融合后获得了高分辨力的全景深图像。

客观评价采用频域指标(quality of frequency domain, QF)和空域梯度指标(quality of spatial domain, QG)对图像清晰度进行量化。频域指标 QF 利用二维傅里叶离散变换中加权系数对频谱中高频成分的强调表征图像清晰度;梯度指标 QG 为采用 Sobel 算子的 Tenengrad 函数从水平和垂直方向计算代表图像边缘锐利程度的梯度值,利用清晰图像比模糊图像具有更大梯度值来获取评价清晰度性能。表 3 所示为分别对原始图像和融合后图像清晰度的量化情况,结果表明:采用所获取的叠焦图像融合后的图像对比原始各图像在清晰度量化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。

表 3 清晰度客观评价表

评价指标	<i>FM1</i>	<i>FM2</i>	<i>FM3</i>	<i>Fused</i>
QF	4. 129	4. 894	3. 454	5. 964
QG/($\times 10^3$)	5. 603	9. 745	5. 088	12. 978

综合主观评价与客观评价,所提的跨模式全景深成像装置对各个深度表面的微小细纹具有显著的成像表现。单视点成像的全景深及高分辨力要求能够满足在 40~1 000 mm 跨度下对 0.5 mm 裂纹的明确分辨。

2. 5 全景拼接实验

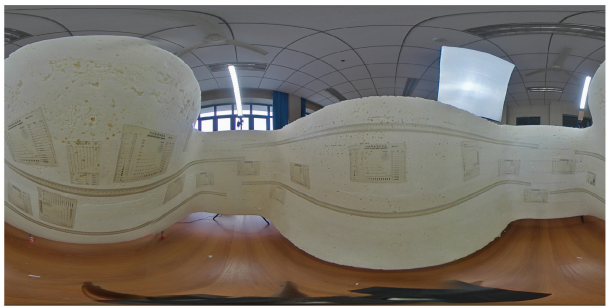
图 9(a)展示了分别对①~⑧视点图像进行全景深融合处理后的全景序列图像;图 9(b)展示了对图 9(a)全景序列图像进行全景拼接后的异形管道全景图;图 9(c)为与图 9(a)相同实验场景下利用理光 SC2 获得的全景图像。与图 9(c)中理光 SC2 全景相机所获得的全景图进行比较,可知:同样场景下,SC2 相机由于使用了鱼镜头,虽然能够获得更大的垂直视场角,但所获得的全景图整体清晰程度不能很好的分辨异形管道表面细微条纹,而本文所研制的成像装置获得的单视点图像可以获取异形管道内径向自由深度变化条件下的清晰内壁图像,且在全景拼接的情况下依然具备显著细微条纹表现能力。



(a) 多视点全景深序列图像
(a) Full depth of field sequence image under multi-viewpoint



(b) 本文全景图
(b) Panorama in this article



(c) 理光SC2全景相机全景图像
(c) Panorama of Ricoh SC2 panoramic came

图 9 异形管道模型内全景拼接

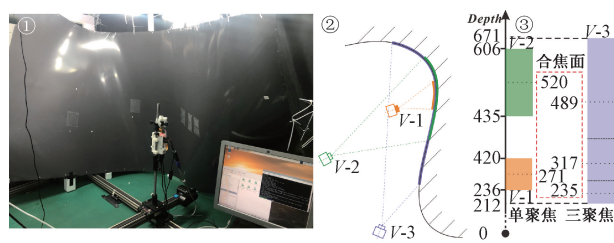
Fig. 9 Panoramic stitching in the irregular pipe model

2. 6 多场景下的成像适应性实验

除异形管道之外,面向自由曲面、常规管道、狭小通道、不规则腔体等场景表面成像时,常表现出成像表面深度跨度变化大及成像视角不确定等问题,为满足成像表面整体深度分布对成像景深的要求,可以采用本文装置进行跨模式成像。

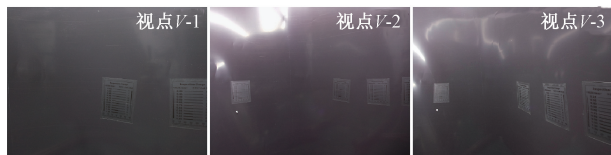
图 10(a)分别展示了①由薄铁皮搭建的自由曲面成像实验场景和②场景中 3 个不同成像视点的位姿示意,以及③该场景下不同视点间的深度覆盖与景深关系情况。通过对自由曲面在 3 个不同视点 $V-1$ 、 $V-2$ 、 $V-3$ 进行成像并分析比较,验证所研装置的跨模式成像能力与自适应性,各视点最终成像结果如图 10(b)所示。此外,分别对直径 580 mm 圆桶的内表面与宽 260 mm 的狭窄通道内部进行了成像实验,其实验最终效果如图 10(c)所示。

由上述适应性实验结果可知,面对自由曲面成像时,尽管成像视点不同,或在不同场景下成像时成像对象不同,所设计的成像装置仍能很好的实现各种场景条件下的跨模式成像,说明所提跨模式成像方法及成像装置具有较好的场景适应性。



(a) 自由曲面实验场景及三视点状态

(a) Freeform surface experimental scene and its three views state



(b) 三视点实验结果

(b) Experimental image of three views



(c) 圆桶及狭窄通道内成像实验

(c) Imaging experiment in barrel and narrow channel

图 10 多场景下适应性实验

Fig. 10 Adaptability experiment under multiple scene

3 结 论

本文针对异形管道轮廓复杂、径向成像景深跨度大的特点提出基于深度感知的跨模式全景深成像方法,能够克服基于图像处理的聚焦方法在管道内表面少纹理、弱光照情况下的聚焦失败问题,同时改善了传统径向成像在异形管道内适应性差、景深不足等的情况。特别的,由于具备了基于深度数据融合的自适应性,且深度分割后的景深深度范围不重合或小范围重合,因此相比于传统的叠焦法,所提叠焦法能够在保证成像质量的同时实现更好的成像效率。为验证所提成像方法的实际工作性能,研制了具备深度感知能力的跨模式成像装置,并在异形管道模型内进行了 8 视点全景序列图像的获取实验与多场景下适应性实验:首先,通过对不同深度分布的管道内表面自适应地执行不同模式条件下的中间深度聚焦成像方法,或阶梯下落叠焦成像方法实现异形管道内表面信息的完整获取;其次,对所获得的多聚焦图像进行改进的小波域多聚焦图像融合实现景深拓展;最后,通过对环形多视点全景深图像的拼接得到异形管道内高分辨力全

景图。实验结果表明:根据所提跨模式全景深成像方法设计的成像装置能够利用探测到的视野内深度数据,快速且清晰的获取包含管道完整内壁信息的单聚焦图像或叠焦图像序列,其中对叠焦图像进行多聚焦融合后的全景深图像能够在 40~1 000 mm 深度跨度条件下分辨出 0.5 mm 宽的微小裂纹,为异形管道内缺陷检测及损伤分析提供可靠的图像支撑。

与大视场角鱼眼相机相比,所研装置垂直视场角视角相对小,同时在面对大深度表面,尤其是多视点全景成像时,随着多聚焦模式下序列图像数量的增加,将直接影响全景深融合的效率以及多视点图像的拼接速度。但本成像方法及装置利用其具有的深度感知功能,实现了不同管径的常规管道、不规则腔体、大跨度深度变化的自由曲面、狭小不易检空间等场景内的自适应全景深高分辨力图像采集,具有全景深成像速度快、分辨率高等优点,为异形空间内的微小缺陷检测提供了有效的成像解决方案。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王庆峰, 张全法, 李宏成. 管道内壁图像无畸变重建及摄像机标定研究[J]. 测控技术, 2012, 31(1): 13-15, 20.
WANG Q F, ZHANG Q F, LI H CH. Study on distortion-less reconstruction of pipeline inner wall image and camera calibration [J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(1): 13-15, 20.
- [3] 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.
- [4] 张乐, 周洲, 许晓平. S 弯进气道隐身设计中截面积和中心线影响[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(8): 2999-3006.
ZHANG L, ZHOU ZH, XU X P. Area and centerline distribution on stealth design of S-shaped inlet [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8):

- 2999-3006.
- [5] TANG M, LIU C, 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] XU X, ZHANG X, FU H, et al. Robust passive autofocus system for mobile phone camera applications[J]. Computers & Electrical Engineering, 2014, 40(4): 1353-1362.
- [7] CHENG J C P, WANG M. Automated detection of sewer pipe defects in closed-circuit television images using deep learning techniques [J]. Automation in Construction, 2018, 95: 155-171.
- [8] HAWARI A, ALAMIN M, ALKADOUR F, et al. Automated defect detection tool for closed circuit television (CCTV) inspected sewer pipelines [J]. Automation in Construction, 2018, 89: 99-109.
- [9] 张欣婷, 亢磊, 吴倩倩. 双波段 CCTV 鱼镜头光学系统设计[J]. 应用光学, 2021 42(6): 1006-1010.
- ZHANG X T, KANG L, WU Q Q. Optical system design of sual band CCTV fish-eye lens[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1006-1010.
- [10] TEZERJANI A D, MEHRANDEZH M, PARANJAP R. Optimal spatial resolution of omnidirectional imaging systems for pipe inspection applications[J]. International Journal of Optomechatronics, 2015, 9(4): 261-294.
- [11] 景文博, 高雪峰, 黄炳坤, 等. 圆柱物体内壁的锥面折反射全景图像展开[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 89-98.
- JING W B, GAO X F, HUANG B K, et al. Expansion of conical catadioptric panoramic image of inner surface of cylindrical objects [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 89-98.
- [12] KARKOUB M, BOUHALI O, SHEHARYAR A. Gas pipeline inspection using autonomous robots with omnidirectional cameras [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(14): 15544-15553.
- [13] ZHOU Q, TIAN Y, WANG J, et al. Design and implementation of a high-performance panoramic annular lens [J]. Applied Optics, 2020, 59 (36): 11246-11252.
- [14] ZHANG K, ZHONG X, ZHANG L, et al. Design of a panoramic annular lens with ultrawide angle and small blind area [J]. Applied Optics, 2020, 59 (19): 5737-5744.
- [15] 汤一平, 严海东, 陈龙艳, 等. 无死角的全方位视觉传感器的设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(5): 916-920.
- TANG Y P, YAN H D, CHEN L Y, et al. Design of omni-directional vision sensor without dead angle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(5): 916-920.
- [16] 汤一平, 吴挺, 袁公萍, 等. 适用于管道内形貌检测的 3D 全景视觉传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 726-733.
- TANG Y P, WU T, YUAN G P, et al. 3D omni-directional vision sensor for morphology defects detection in pipelines [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 726-733.
- [17] 陈立栋, 王伟, 张鹏飞, 等. 考虑反射镜姿态标定的互补全景图像配准研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1809-1817.
- CHEN L D, WANG W, ZHANG P F, et al. Research on complementary panoramic image registration considering pose calibration of reflecting mirrors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1809-1817.
- [18] 唐爱平. 管道内壁全景图像自适应展开算法研究[J]. 图学学报, 2015, 36(6): 973-978.
- TANG AI P. Research of adaptive expansion algorithm on pipeline inner-surface panoramic image [J]. Journal of Graphics, 2015, 36(6): 973-978.
- [19] 卜雄洙, 李桂娟, 杨波, 等. 中心偏移的全景环形图像快速展开 [J]. 光学 精密工程, 2012, 20(9): 2103-2109.
- BU X ZH, LI G J, YANG B, et al. Fast unwrapping of panoramic annular image with center deviation [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20 (9): 2103-2109.
- [20] 宋阳, 周亚丽, 张奇志. 鱼镜头径向畸变的校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 1014-1023.
- SONG Y, ZHOU Y L, ZHANG Q ZH. Correction method for radial distortion of fisheye lens[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (4): 1014-1023.
- [21] ZHAO J, WEI S, LIAO L, et al. DQN-based gradual

- fish-eye image rectification [J]. Pattern Recognition Letters, 2021, 152: 129-134.
- [22] 张振友, 杨岐子, 于政庆, 等. 数字式高炮身管疵病检测仪的设计[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 590-594.
- ZHANG ZH Y, YANG Q Z, YU ZH Q, et al. Research on digital detector for detecting the flaws of anti-aircraft artillery barrel[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(4): 590-594.
- [23] 王会峰, 刘上乾, 汪大宝, 等. 旋转扫描序列图像的全景图拼接方法[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1211-1215.
- WANG H F, LIU SH Q, WANG D B, et al. Panoramic image mosaic method for rotary scanning serial image[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1211-1215.
- [24] AKPINAR U, SAHIN E, MEEM M, et al. Learning wavefront coding for extended depth of field imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 3307-3320.
- [25] ACOSTA E, OLVERA-ANGELES M, GONZALEZ-AMADOR E, et al. Wavefront coding with Jacobi-Fourier phase masks for retinal imaging[J]. Applied Optics, 2020, 59(22): G234-G238.
- [26] 潘超, 陈家璧, 张荣福, 等. 波前编码景深延拓成像系统模拟实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1261-1265.
- PAN CH, CHEN J B, ZHANG R F, et al. Research of imaging simulation experiments of wavefront coding system for extending depth of field[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6): 1261-1265.
- [27] BANERJI S, MEEM M, MAJUMDER A, et al. Extreme-depth-of-focus imaging with a flat lens[J]. Optica, 2020, 7(3): 214-217.
- [28] IHRKE I, RESTREPO J, MIGNARD-DEBISE L. Principles of light field imaging briefly revisiting 25 years of research[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2016, 33(5): 59-69.
- [29] 吉勇, 李晨, 屠大维, 等. 水下光场成像清晰度增强研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 66-72.
- JI Y, LI CH, TU D W, et al. Research on definition enhancement of underwater light field imaging[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 66-72.
- [30] WILBURN B, JOSHI N, VAISH V, et al. High performance imaging using large camera arrays[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 765-776.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 魏利胜, 张平改. 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.
- [34] 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.
- YOU 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.
- [35] 焦继超, 赵保军, 周刚. 一种傅里叶——梅林变换空间图像快速配准算法[J]. 兵工学报, 2010, 31(12): 1551-1556.
- JIAO J CH, ZHAO B J, ZHOU G. A fast image registration algorithm based on Fourier-Mellin transform for space image [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(12): 1551-1556.
- [36] LIU S, CHEN J, RAHARDJA S. A new multi-focus image fusion algorithm and its efficient implementation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 30(5): 1374-1384.

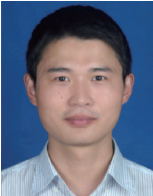
作者简介



王爽杰,2018 年于江苏科技大学获得学士学位,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: wsj864863@163.com

Wang Shuangjie received his B. Sc. degree from Jiangsu University of Science and Technology in 2018. He is currently a master student at Nantong University. His main research interests include visual perception and detection.



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。

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.



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 2007, 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.