

基于计算光场成像的曲面客体表面指纹提取

刘兴军^{1,2,3}, 陆彦婷^{1,2*}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

³中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

摘要 指纹具有的唯一性和终身不变性使其在刑侦检测和身份识别等领域具有广泛应用。传统指纹提取方式会破坏原始指纹,因此,近年来多采用刑侦取证相机对指纹进行拍摄、提取。针对一次拍摄不能得到曲面客体表面指纹清晰图像的问题,将计算光场成像引入曲面客体表面指纹的提取中。首先,根据指纹拍摄场景设计指纹光场相机,利用数字重聚焦算法得到指纹图像堆栈;然后,基于图像清晰度评价的图像融合算法得到曲面上各处都清晰的指纹图像。实验结果表明,本方法设计的指纹光场相机及处理算法可以有效提取位于曲面客体表面的指纹。

关键词 成像系统; 计算成像; 光场相机; 指纹提取

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811024

Extracting Fingerprints from Surface of Curved Objects Using Computational Light-Field Imaging

Liu Xingjun^{1,2,3}, Lu Yanting^{1,2*}

¹Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

²CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

³School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Fingerprints are widely used in the fields of criminal investigation and identification due to their uniqueness and lifelong invariance. Recently, criminal investigation forensic cameras are commonly used to extract fingerprints by taking photos as the traditional fingerprint extraction methods destroy the original fingerprint. Aiming at the problem that a clear image of the surface fingerprint from a curved object cannot be obtained in one shot, this study introduces the computational light-field imaging for the surface fingerprint extraction from the curved object. First, the fingerprint light-field camera is designed according to the fingerprint-shooting scene and the digital refocusing algorithm is used to obtain the fingerprint image stack. Then, the image fusion algorithm based on the image sharpness evaluation obtains a clear fingerprint image from the curved surface. Experimental results show that the fingerprint light-field camera and processing algorithm designed using the method can effectively extract fingerprints from the surface of curved objects.

Key words imaging systems; computational imaging; light-field camera; fingerprint extraction

OCIS codes 110.1758; 110.5200; 110.3000

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-16; 录用日期: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11703060)、国家自然科学基金面上项目(11873069)

通信作者: *ytlu@niaot.ac.cn

1 引言

指纹具有的唯一性、终身不变性使其在刑侦领域中发挥着重要作用^[1]。在刑侦中,为了与指纹库中的指纹进行对比,进而确定嫌疑人的身份,需要在犯罪现场快速准确提取指纹。传统方法主要通过碘熏、磁性粉刷显、502 贴显等方式显现指纹,然后利用胶带将指纹转移固定在能够增强色差的衬底上,从而进行后续的观察分析,但这种方法会破坏原始指纹,影响再次取证^[2-3]。

随着紫外照射显现指纹技术和数码影像技术的发展,基于数字摄影的客体表面指纹提取方式逐渐得到了广泛应用^[4]。刑侦取证相机可对桌面、墙面以及玻璃上的指纹进行拍照提取,得到纹路清晰的指纹图像,但这些相机只适用于拍摄平面客体表面上的指纹。对于分布在曲面上的指纹,如犯罪现场的把手、栏杆、杯具等曲面上的指纹,由于需要近距离拍摄,且指纹的反射光线较弱,一般采用采用大光圈镜头的相机,拍照景深较短,无法得到各处都清晰的指纹图像。针对该问题,人们尝试先对分布在曲面客体上的指纹进行多角度拍摄,然后通过图像拼接获得完整的指纹图像^[5]。基于多次拍摄再拼接的思想研制的曲面客体展平装置^[6]将指纹成像系统与机电驱动旋转载物台联动,完成了曲面客体表面上指纹的提取。对于分布在曲率较小曲面上的指纹,

若仅通过一次拍照就获得指纹各处都清晰的图像,可极大提高犯罪现场的取证效率。

传统相机成像将不同方向光线的强度在图像传感器像素上进行积分,只采集了光线的强度信息,丢失了方向信息。计算光场成像^[7-9]是成像领域的研究热点,光场相机^[8]利用微透镜阵列同时采集光线的强度和方向信息,使拍摄后的计算重聚焦成为可能,近年来在多个领域中得到了广泛的应用,如显微成像^[10-11]、生物特征识别^[12-13]、三维测距^[14-17]、三维成像^[18-19]、图像深度估计^[20-22]、信息加密^[23]。基于计算光场成像对图像的重塑性,本文使用计算光场成像解决了曲面客体表面的指纹提取问题。针对指纹拍摄的场景设计合适的光场相机,通过数字重聚焦以及基于图像清晰度评价的图像融合算法,计算得到曲面各处都清晰的指纹图像。

2 基本原理

利用计算光场成像提取曲面客体表面指纹的步骤:1)根据实际指纹拍摄场景设计光场相机,采集指纹光场数据;2)对指纹光场数据进行数字重聚焦,得到一系列聚焦在不同深度的图像,形成指纹图像堆栈;3)基于图像的清晰度融合指纹图像堆栈,生成一幅各处都清晰的指纹图像。曲面指纹提取的流程如图 1 所示,其中, u 为光线和主透镜的交点, x 为光线与焦距 F_i 处图像传感器的交点, x' 为重聚焦到 F'

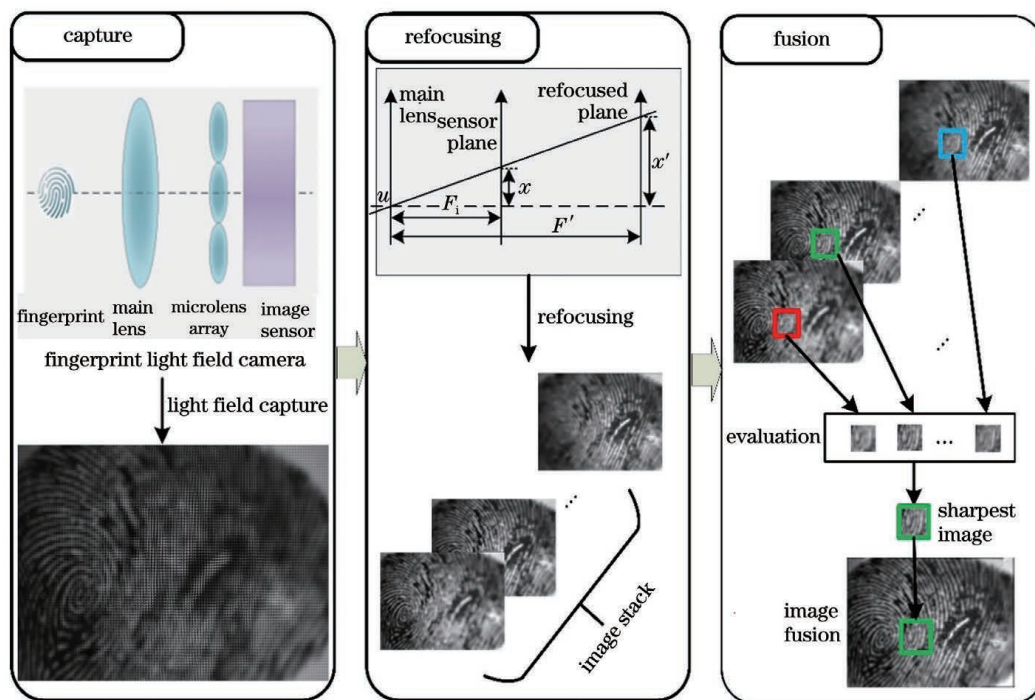


图 1 曲面指纹的提取流程

Fig. 1 Extraction process of the curved surface fingerprint

后光线与图像传感器的交点。

2.1 指纹光场相机的设计

不同于传统相机,光场相机将微透镜阵列放置于主透镜的对焦平面上,将图像传感器放置在微透镜阵列^[24-25]的焦平面处,光场相机的结构如图 2 所示。物体上一点发出的光线经主透镜收集后,在微透镜阵列上会聚为一点,然后通过对应的微透镜到达不同的像元处成像。每个微透镜所成的像可以理解为主透镜光瞳经过该微透镜所成的像,又被称为宏像素。宏像素的尺寸一般与微透镜相等,每个宏像素可覆盖多个图像传感器像元,相当于将主透镜孔径划分为同等数量的子孔径,宏像素下的每个像元对应主透镜光瞳的一个虚拟子孔径。可认为进入同一个主透镜子孔径的光线传播方向近似相同,则宏像素下与当前子孔径对应的像元即为对该方向光线的采样。因此,物体强度的空间分布由宏像素记

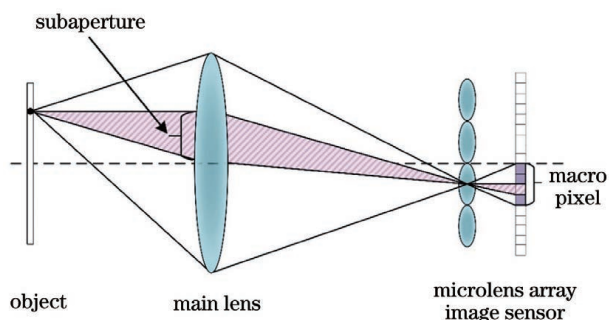


图 2 光场相机的结构

Fig. 2 Structure of the light field camera

表 1 指纹光场相机参数

Table 1 Parameters for the fingerprint light field camera

Parameter	Main lens		Microlens array		Photosensor	
	Focal length /mm	Aperture /mm	Microlens size / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	F-number	Resolution	Pixel size / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)
1	100	40	100×100	4.2	4096×3000	3.45×3.45
2	60	25	100×100	4.2	4096×3000	3.45×3.45

2.2 基于数字重聚焦的指纹图像堆栈

对分布在曲面客体表面上的指纹,用指纹光场相机对焦在指纹的某一处进行拍照,并采集光场数据。然后,对指纹光场数据进行数字重聚焦^[8],得到一系列聚焦到不同深度的图像,形成指纹堆栈图像。实验使用空域数字重聚焦算法进行指纹图像重聚焦。首先,引入光场参数化表示。空间中一条光线可以用两个平面进行参数化^[26],以传统相机为例,其参数化原理如图 3 所示。光线与主透镜平面相交于点 (u, v) ,与传感器平面相交于点 (x, y) ,则

录,物点发出光线的方向信息则由对应宏像素下的像元记录。

实验中光场相机的拍摄对象是指纹,经小范围测量统计发现,成年人拇指指纹的平均长度约为 30 mm,指纹纹路的平均宽度约为 0.4 mm。将长度为 30 mm 的指纹印在一个直径为 100 mm 的圆柱体表面上,根据弧长与高的几何关系可知,指纹的分布深度约为 2.2 mm。因此,将指纹光场相机能处理的最大弯曲深度设为 3 mm,即指纹光场相机的合成景深需达到 3 mm。

为了对指纹纹路细节进行清晰成像,需将宽度为 0.4 mm 的指纹纹路至少成像在 2 个宏像素上,以保证在最后的指纹图像上分辨出指纹纹路。实验采购的微透镜阵列间距最小为 0.1 mm,用指纹光场相机的主透镜成像时,对宽度为 0.4 mm 的物体所成像的尺寸至少为 0.2 mm,即指纹光场相机的主透镜成像放大率 $m \geq 0.5$ 。指纹光场相机的合成景深为 3 mm,即其子孔径的景深需达到 3 mm,基于景深公式,可估算出子孔径大小。为了最大化图像传感器中的像元利用率,一般使相邻微透镜所成的子光瞳边界尽可能相切,即主透镜的像方 F 数和微透镜的 F 数需匹配。为了保证主透镜的子孔径采样数,还需考虑图像传感器的像元尺寸。基于上述约束条件设计指纹光场相机,得到的两组光场相机参数如表 1 所示。

该光线的辐射亮度可用四维函数表示为 $L_{F_1}(u, v, x, y)$ 。传感器上任意一个像元记录的辐射照度为到达该像元所有光线的积分,可表示为

$$E_{F_1}(x, y) = \frac{1}{F_1^2} \iint L_{F_1}(u, v, x, y) du dv. \quad (1)$$

数字重聚焦的原理如图 4 所示,一条光线经过主透镜到达传感器平面 (x, y) 处,其辐射亮度为 $L_{F_1}(u, v, x, y)$ 。若传感器平面向后移动至与主透镜相距 F' 处,则该光线与重聚焦面的交点为 (x', y') ,其辐射亮度为 $L_{F'}(u, v, x', y')$ 。由几何光学原理

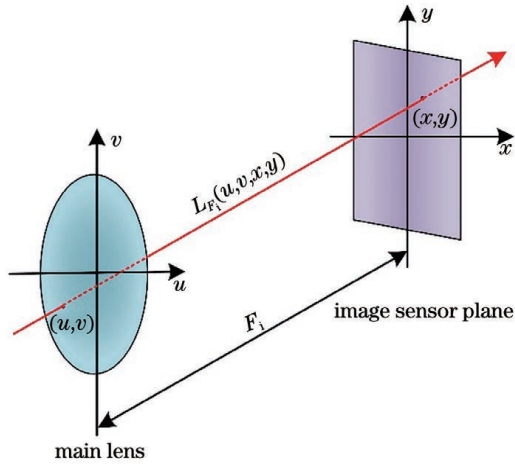


图 3 光场的双平面参数化

Fig. 3 Two-plane parameterization of the light field

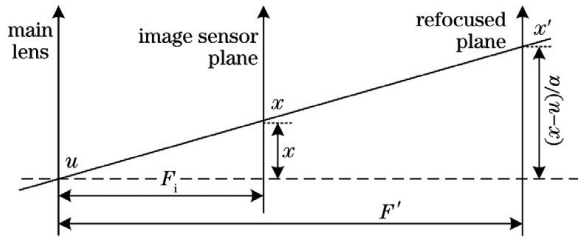


图 4 光场重聚焦的原理

Fig. 4 Principle of the light field refocusing

可知,光线在自由空间中传播时能量不变,则 $L_{F_i}(u, v, x, y) = L_{F'}(u, v, x', y')$ 。

由图 4 中的几何关系可知

$$\frac{x-u}{F_i} = \frac{x'-u}{F'} \quad (2)$$

$$x = u + \frac{x'-u}{\alpha} = u \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x'}{\alpha} \quad (3)$$

式中, $\alpha = F_i/F'$ 为调焦系数。则

$$L_{F_i}(u, v, x, y) = L_{F'} \left[u, v, u \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x'}{\alpha}, v \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{y'}{\alpha} \right] \quad (4)$$

结合(1)式和(4)式,得到重聚焦面的光线辐射照度分布为

$$E_{(\alpha \cdot F_i)}(x, y) = \frac{1}{(\alpha \cdot F_i)^2} \iint L_{F_i} \times \left[u, v, u \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x'}{\alpha}, v \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{y'}{\alpha} \right] dudv \quad (5)$$

式中, $E_{(\alpha \cdot F_i)}$ 为在深度 F' 处的图像强度分布。(5)式为空间域数字重聚焦算法的理论基础,将光场相机对焦至深度 F_i 处采集指纹光场数据后,根据(5)式就能计算出对焦至深度 $\alpha \cdot F_i$ 处的指纹重聚焦像。改变 α , 可以计算出不同深度上的指纹重聚焦

像,得到聚焦在不同深度的指纹图像集合,即指纹图像堆栈。

2.3 基于图像清晰度的指纹图像融合

在指纹图像堆栈中,曲面指纹各处成像最清晰的局部图像分别位于不同深度重聚焦图像上,因此,需要在图像堆栈中找出指纹各处最清晰的局部图像,再将其融合成一幅各处都清晰的全聚焦图像。实验利用图像清晰度评价指标寻找最清晰的局部指纹图像,对于图像某一位置的像素,首先,分别在堆栈中的每幅图像上选取以该位置像素为中心的 9×9 邻域,并计算每个邻域对应的清晰度评价价值;然后,在图像堆栈中选取最优评价价值对应图像在当前位置的像素值,并将其融合到最终图像的相同位置处。逐像素依次进行该过程,就能得到一幅各处都清晰的指纹图像。对于位于图像边缘的像素,进行对称边缘填充。图像融合的关键步骤是计算感兴趣像素邻域的评价价值,本方法用三种图像清晰度评价函数作为评价指标,包括 Tenegrad 函数、Laplace 函数和 Variance 函数。

1) Tenegrad 函数利用图像梯度进行清晰度评价。首先,用 Sobel 算子与图像进行卷积运算,得到图像水平方向的梯度分量 $G_x(x, y)$ 和垂直方向的梯度分量 $G_y(x, y)$, 可表示为

$$G_x(x, y) = f(x, y) \otimes \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$G_y(x, y) = f(x, y) \otimes \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, \otimes 为卷积运算。图像各像素梯度的模 $G(x, y)$ 可表示为

$$G(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (8)$$

对某一像素的邻域图像进行评价时,将邻域内所有像素梯度的模平方和作为评价函数,可表示为

$$F_{\text{Tenegrad}} = \sum_x \sum_y [G(x, y)]^2 \quad (9)$$

图像中位于细条状结构上的像素梯度模较大,含有清晰细条结构的邻域对应的 Tenegrad 函数也较大。因此, Tenegrad 函数可作为指纹图像的清晰度评价指标。

2) Laplace 函数利用图像二阶微分对清晰度进行评价。先利用 Laplace 模板与图像进行卷积运算,得到 Laplace 滤波图像 $L(x, y)$

$$L(x, y) = f(x, y) \otimes \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

对某一像素的邻域进行评价时,将邻域内各像素对应的 Laplace 滤波图像值平方和作为评价函数,可表示为

$$F_{\text{Laplace}} = \sum_x \sum_y L^2(x, y). \quad (11)$$

与基于梯度的评价类似, Laplace 函数对图像中细条状结构的响应较大,因此, Laplace 函数可作为指纹图像的清晰度评价指标。

3) Variance 函数以图像局部邻域的方差作为清晰度评价指标,可表示为

$$F_{\text{Variance}} = \sum_x \sum_y \{ [f(x, y) - \mu]^2 \}, \quad (12)$$

式中, μ 为邻域内所有像素的平均灰度值。

模糊图像的灰度值变化范围小、离散度低、方差较小,而清晰图像的灰度值变化范围大、离散度高、方差较大。对于指纹这样的条状结构,模糊的指纹图像局部方差小,清晰的指纹图像局部方差大,因此,可用图像局部邻域的方差作为指纹图像的清晰

度评价指标。

3 实验结果及分析

为验证指纹光场相机的可行性,搭建了一套指纹光场相机原理验证系统。刑侦指纹提取多在紫外波段进行,但验证计算成像的曲面指纹提取方法时可使用可见光波段。图 5 为指纹光场相机的实物图,相机主镜头(Edmund, #86-410)的焦距为 100 mm、口径为 35.7 mm;微透镜阵列(RPC Photonics, MLA-S100-f4)是 F 数为 4.2 的正方形阵列,微透镜的直径为 0.1 mm;图像传感器(Edmund, #11-517)的像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,分辨率为 4096×3000 。由于微透镜阵列的焦距特别短,实验室条件下无法将图像传感器靶面放置在微透镜阵列的焦面处,因此,采用中继透镜完成微透镜阵列焦面上像到图像传感器的中继成像。实验中使用口径为 50 mm、焦距为 75 mm 的双胶合消色差透镜和焦距为 50 mm 的定焦距镜头(Edmund, #67-717)组合成中继透镜组,实现近似 1:1 的中继成像。

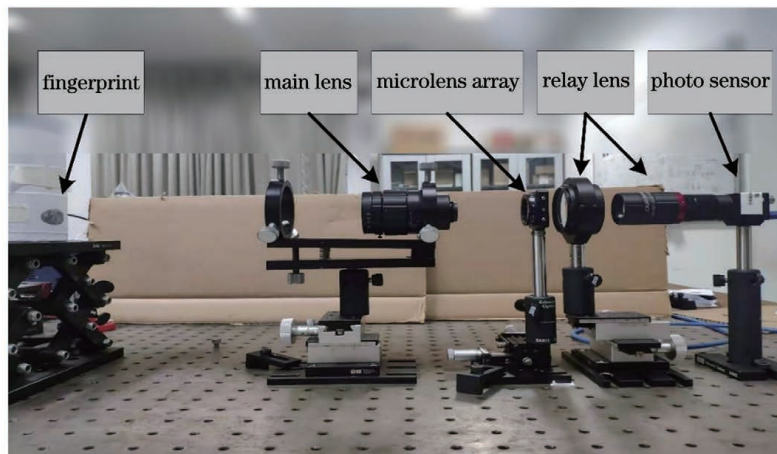


图 5 指纹光场相机的实物图

Fig. 5 Physical image of the fingerprint light field camera

将指纹印在纸上然后粘贴在圆柱体表面模拟拍摄对象,成像区域范围内指纹的弯曲深度超过 3 mm,符合相机设计的预设场景。图 6 为对焦在指纹漩涡处拍摄的指纹光场图像及其局部原尺寸图,实验中光场相机定标所用的白图像通过拍摄一白色面光源得到。

按照数字重聚焦原理,对拍摄的指纹光场数据进行重聚焦,其中,调焦系数 α 从 0.8 以 0.05 的步长递增至 1.4,共 13 步。用 13 幅重聚焦图像组成指纹图像堆栈,部分图像如图 7 所示。可以发现,不

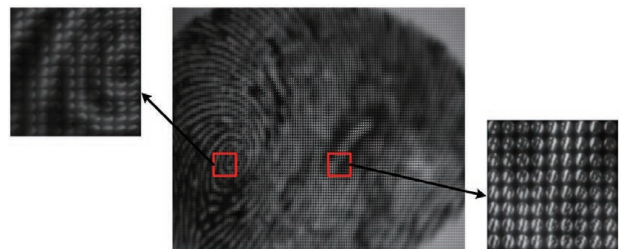


图 6 指纹光场图像及其局部尺寸

同 α 对应的图像清晰部位明显不同,重聚焦结果符合预期效果。

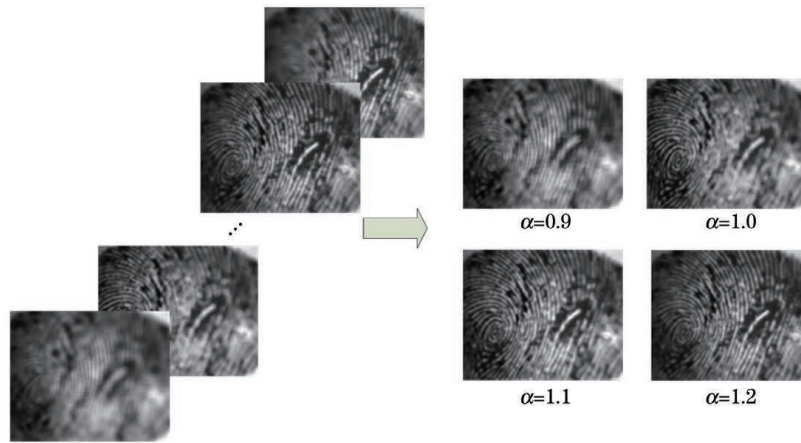


图 7 重聚焦图像堆栈及部分重聚焦图像

Fig. 7 Refocusing image stack and partial refocused images

用三种图像清晰度评价指标分别对指纹图像堆栈进行融合,结果如图 8 所示。可以发现,基于 Laplace 函数评价的融合方法效果最佳。图 9 为不同图像融合方法效果的剖线对比图,可以发现,图 9(a)中的纵线对焦清晰,三种图像融合方法在纵线处的剖线结果与原始对焦指纹图相同像素的取值基本相同。图 9(a)中的横线对焦模糊,三种图像融

合方法在横线处的剖线结果与原始对焦指纹图相同像素处的取值差异较大,这表明融合后指纹的清晰程度有明显提升;且采用 Laplace 函数作为评价指标进行融合时,该差异较小,这表明基于 Laplace 函数的融合方法效果更好,与图 8 中的视觉观察结论相符。此外,Laplace 函数的计算量在三种图像清晰度评价指标中居中。

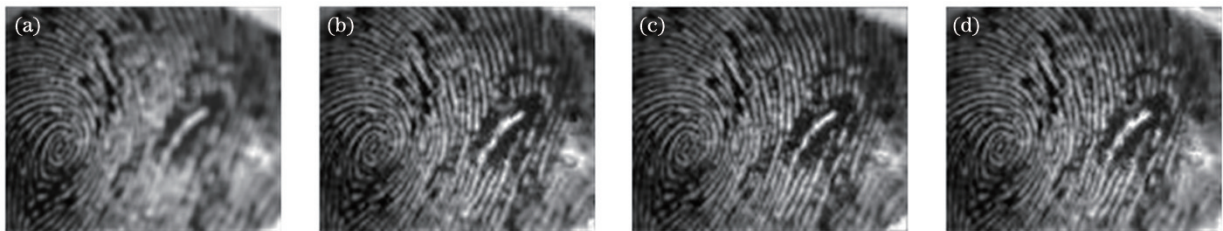


图 8 不同方法得到的指纹融合图。(a)原始图像;(b) Tenegrad 函数;(c) Laplace 函数;(d) Variance 函数

Fig. 8 Fingerprint fusion map obtained by different methods. (a) Original image; (b) Tenegrad function; (c) Laplace function; (d) Variance function

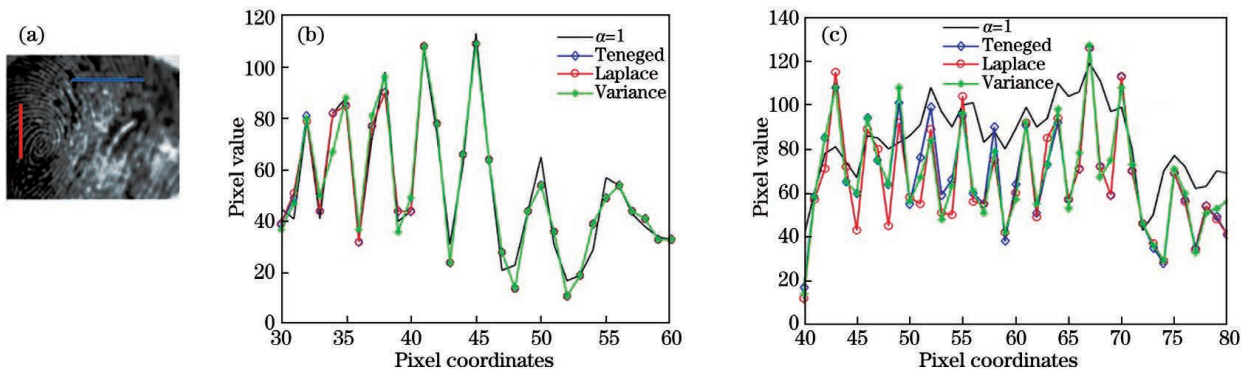


图 9 不同方法融合效果的剖线。(a)原始图像;(b)纵线处的剖线;(c)横线处的剖线图

Fig. 9 Sectional lines of the fusion effect of different methods. (a) Original image; (b) section line at the vertical line; (c) section line at the horizontal line

4 结 论

提出了一种基于计算光场成像的曲面指纹提取

方法,首先,根据指纹拍摄的应用场景设计指纹光场相机并采集指纹光场数据;然后,对指纹光场数据进行一系列数字重聚焦获得指纹图像堆栈;最后,基于

图像清晰度的融合方法将指纹图像堆栈融合成一幅全聚焦指纹图像。实验结果表明,Laplace 函数最适合作为指纹图像清晰度评价指标。此外,定制微透镜间距更小的微透镜阵列,优化光场相机参数设计,能进一步提高计算指纹图像的分辨率。同时,融合结果中各像素对应的调焦因子 α 可得到各像素的深度信息,对清晰的曲面指纹图像进行展平,从而用于指纹图像的对比。

参 考 文 献

- [1] Prabhakar S, Pankanti S, Jain A K. Biometric recognition: security and privacy concerns[J]. IEEE Security & Privacy, 2003, 1(2): 33-42.
- [2] Dalrymple B E, Duff J M, Menzel E R. Inherent fingerprint luminescence-detection by laser [J]. Proceedings of SPIE, 1977, 0108: 118-125.
- [3] Shao L F, Hao J P, Chang B N, et al. The effects of latent fingerprint development light on subsequent DNA analysis of sweat [J]. Forensic Science and Technology, 2012(1): 24-26.
邵丽芳, 郝金萍, 常柏年, 等. 短波紫外照射对汗潜手印 DNA 检测的影响初探[J]. 刑事技术, 2012(1): 24-26.
- [4] Yang R, Luo W Q, Huang J W. Multimedia forensics[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2013, 43(12): 1654-1672.
杨锐, 骆伟祺, 黄继武. 多媒体取证[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(12): 1654-1672.
- [5] Li Y. Research on multi-sample, multi-unit multi-view, multi-modal biometric recognition[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 72-74.
李永. 多样本、多单元、多角度、多模态生物特征识别技术的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 72-74.
- [6] Cai N B, Huang X C, Jiang M, et al. Device for visualizing and unfolding latent fingermarks on cylindrical surface[J]. Image Technology, 2015, 27(5): 55-57, 59.
蔡能斌, 黄晓春, 姜梅, 等. 圆柱体表面潜在指印的显现及图像展平装置[J]. 影像技术, 2015, 27(5): 55-57, 59.
- [7] Zhou Z L. Research on light field imaging technology [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012: 25-39.
周志良. 光场成像技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012: 25-39.
- [8] Fang L, Dai Q H. Computational light field imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111001.
- 方璐, 戴琼海. 计算光场成像[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111001.
- [9] Ng R. Digital light field photography[D]. California: Stanford University, 2006.
- [10] Levoy M, Ng R, Adams A, et al. Light field microscopy [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 924-934.
- [11] Li L H, Li R B, Wang X Z, et al. Light field optical microscope and light field microscopic imaging analysis system thereof: CN110554495A [P]. 2019-12-10.
李莉华, 李荣彬, 王孝忠, 等. 一种光场光学显微镜及其光场显微成像分析系统: CN110554495A [P]. 2019-12-10.
- [12] Raghavendra R, Raja K B, Busch C. Presentation attack detection for face recognition using light field camera[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(3): 1060-1075.
- [13] Raghavendra R, Raja K B, Yang B, et al. Combining iris and periocular recognition using light field camera [C] // 2013 2nd IAPR Asian Conference on Pattern Recognition, November 5-8, 2013, Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2013: 155-159.
- [14] Sun F S, Han X. Multi-objective fast ranging method based on microlens array light field camera[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0815001.
孙福盛, 韩燮. 基于微透镜阵列型光场相机的多目标快速测距方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0815001.
- [15] Wu J, Li Z C, Zheng J W, et al. Three-point light pen space coordinate measurement based on light field epipolar plane image ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0512002.
吴军, 李泽川, 郑建文, 等. 基于光场极平面图像测距的三点式光笔空间坐标测量[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0512002.
- [16] Wu J L, Guo Z H, Chen X F, et al. Three-dimensional measurement method of light field imaging based on deep learning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204005.
伍俊龙, 郭正华, 陈先锋, 等. 基于深度学习的光场成像三维测量方法研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204005.
- [17] Yu Z J, Zheng J W, Tao Y K, et al. Three-point light pen measurement method based on light field imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 032001.
于之靖, 郑建文, 陶永奎, 等. 基于光场成像的三点式光笔测量方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 032001.
- [18] Wu Q Y, Huang H T, Chen S Z, et al. Research on

- 3D imaging technology of light field based on structural light marker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303019.
- 吴庆阳, 黄浩涛, 陈顺治, 等. 基于结构光标记的光场三维成像技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303019.
- [19] Zhang B, Liu Y D, Xu C L, et al. Flame temperature reconstruction based on focused light field camera[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(2): 412-416.
- 张彪, 刘煜东, 许传龙, 等. 基于聚焦型光场相机的火焰温度场重建[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(2): 412-416.
- [20] Wu Y C, Cheng X, Xie Y X, et al. Defocusing response function optimization in depth estimation of boundary complex light field image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181027.
- 武迎春, 程星, 谢颖贤, 等. 边缘复杂光场图像的深度估计散焦响应函数优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(18): 181027.
- [21] Chen Z Z, Cai Z W, Liu X L, et al. Active method for accurate light field depth computation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704005.
- 陈智振, 蔡泽伟, 刘晓利, 等. 主动光场精确深度计算方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704005.
- [22] Liu H F, Zhou W, Cai X S, et al. Three-dimensional particle tracking velocimetry based on light field imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111014.
- 刘慧芳, 周骛, 蔡小舒, 等. 基于光场成像的三维粒子追踪测速技术[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111014.
- [23] Chen Q, Xu X P, Jiang Z G, et al. Watermarking scheme for four dimensional light field imaging based on light field camera and its evaluation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0411003.
- 陈琦, 徐熙平, 姜肇国, 等. 基于光场相机的四维光场图像水印及质量评价[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0411003.
- [24] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [J]. *Stanford Tech Report CTSR*, 2005, 2: 1-11.
- [25] Ng R. Fourier slice photography [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 735-744.
- [26] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering [C] // *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH '96*, August 4-9, 1996, New Orleans, LA, USA. New York: ACM Press, 1996: 31-42.