

基于散射元件的无透镜偏振成像系统设计

王江涛*, 王艳红, 武京治

中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

摘要 传统的成像系统由于需要凸透镜等镜头元件, 成像系统的厚度和成本较大。为了使成像系统变得更加紧凑、成本低, 无透镜成像系统迅速发展, 例如无透镜显微镜。利用偏振片采集偏振信息, 并利用双面透明胶带替代凸透镜, 结合计算成像技术, 构建了一个无透镜偏振计算成像系统。系统地介绍了该系统, 并通过实验证明该系统可以实现拍照功能, 采集到的偏振图像符合马吕斯偏振定律。基于散射元件的无透镜偏振成像系统可以有效地减小相机的厚度和成本, 并且可用于偏振图像的采集场合。

关键词 成像系统; 无透镜系统; 计算成像; 偏振

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.061104

Design of Lensless Polarization Imaging System Based on Scattering Elements

Wang Jiangtao*, Wang Yanhong, Wu Jingzhi

School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract Conventional imaging systems have large thickness and high operating cost because of requiring lenses such as convex lenses. To make imaging systems with lower operating cost and better compactness, lensless imaging systems have developed rapidly, such as lensless microscopes. Here, a polarizer is used to achieve polarization information and double-sided transparent tape instead of convex lenses is used to collect object morphologic information. A lensless polarization computed imaging system is constructed and described in detail by combining computational imaging technique. The system is introduced systematically. Its functionality as a camera is demonstrated experimentally; the acquired polarized images comply with the Marius polarization law. The lensless polarization imaging system based on scattering components can reduce the camera thickness and cost, and can be applied to acquisition of polarized images.

Key words imaging systems; lensless systems; computed imaging; polarization

OCIS codes 110.1758; 110.3010; 080.3620

1 引言

目前, 手机摄像头大多凸出于手机背部, 因为摄像头内含有凸透镜, 不利于手机变薄。传统相机利用凸透镜进行成像, 难以减小相机的厚度和成本。如何使相机轻薄化、小型化、经济化成为近些年的研究热点。随着数字图像技术的发展, 计算成像技术^[1]使相机变得更加简单, 无透镜成像系统随之诞生。现阶段出现的无透镜相机省去了透镜等光学器件, 使用其他元件替代透镜, 物体发出的光经过替代

元件后被光电传感器采集, 然后经过计算重建恢复出物体的图像。2016年, 日本日立公司使用带有同心圆图案的光学薄膜作为替换元件; 2017年, 美国莱斯大学研究小组使用优化的振幅掩模替换透镜制作了无透镜显微镜; 2018年, 中国科学院的魏朝奇^[2]采用编码掩模设计了无镜头成像系统。无透镜成像技术的实现方法各有不同, 受到人们越来越多的关注和研究。由于省去了透镜等光学器件, 相机可以朝着更加简单、轻薄、经济的方向发展^[3-6]。

无透镜相机与传统的透镜相机不同的是物体与

收稿日期: 2019-10-29; 修回日期: 2019-11-27; 录用日期: 2019-12-11

* E-mail: 1178749538@qq.com

像在传感器上的对应关系。传统相机中,由于凸透镜的聚焦作用,物体上的一点对应传感器上的一点。而无透镜相机中,物体上的一点对应传感器上的多点,必须通过计算重建得到物体的真实图像。无透镜相机大多依靠掩模等光调制元件替代透镜。掩模相当于编码元件,对物体进行编码,将编码结果映射在传感器上。编码元件通常是振幅掩模、相位掩模、衍射掩模^[7]和微透镜阵列^[8]等,这类无透镜相机具有厚度薄、重量轻、体积小、成本低等优点。

本文采用一个散射片^[9]作为光学调制元件构建无透镜偏振成像系统。散射片采用的是双面透明胶带,具有很好的透光性和散射性,放置在传感器前面1~3 mm左右的位置。散射片的外面放置偏振片,实现偏振光的采集功能。点光源产生的光线通过散射片后,会在传感器上形成焦散图案,该图案作为点扩展函数(PSF)^[10]。PSF是成像系统中对点光源的响应,随着点光源位置的改变编码图像信息。非相干成像系统中,图像相当于物体上每个点形成的PSF叠加之后的总和。最后通过对相机采集到的原始图像信息进行求逆运算实现图像重建,恢复出物体的图像^[11-14]。

2 无透镜偏振计算成像

2.1 无透镜偏振计算成像系统

无透镜偏振计算成像系统原理如图1所示,偏振片采集物体发出的偏振光,偏振光经过光调制元件后被光电传感器接收,此时得到人眼不可辨识的原始图像,经计算机图像处理还原物体的真实图像。实验采用的光调制元件为双面透明胶带。双面透明胶带作为一种散射片,具有随机散射结构,利用该结构对目标物体的光线进行散射。无透镜偏振计算成像系统在传统相机的基础上,用双面透明胶带替代凸透镜等光学器件。双面透明胶带位于图像传感器前1~3 mm的位置。不同的位置,成像的放大倍数不同;位置越远,放大倍数越大。双面透明胶带外面用黑色胶带制作一个光圈,并用黑色胶带将光圈之外的其他相机部件进行密封,确保光线只能通过光圈进入图像传感器。另外,光圈还可以给图像传感器限制一个数值孔径,确保在有效视野范围内,图像传感器可以接收到完整的物体图像。光圈外层放置的偏振片可确保采集到的光为偏振光。

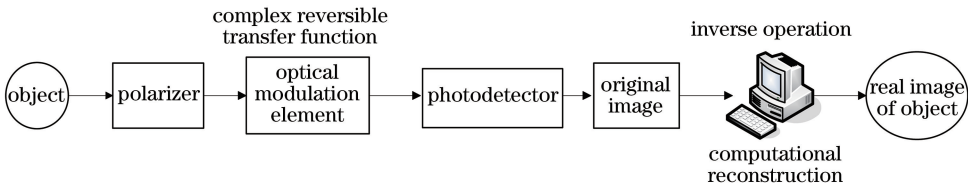


图1 无透镜偏振计算成像系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of lensless polarization computed imaging system

无透镜偏振计算成像系统如图2所示。图2(a)是一个分辨率为500万像素的摄像头模块,将凸

透镜等光学元件去掉后作为无透镜偏振计算成像系统的基础。图2(b)为无透镜偏振计算成像系统的

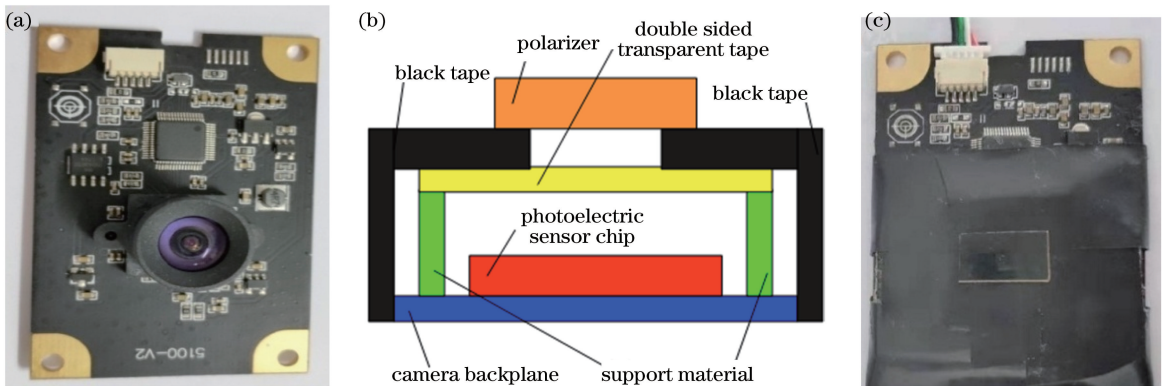


图2 无透镜偏振计算成像系统。(a)有透镜的完整摄像头模块;(b)无透镜偏振系统的横截面示意图;(c)无透镜偏振计算成像系统成品图

Fig. 2 Lensless polarization computed imaging system. (a) Complete camera module diagram with lens; (b) cross-sectional schematic of a lensless polarization system; (c) finished image of lensless polarization computed imaging system

组装横截面示意图,从下到上依次为相机模块基底、图像传感器芯片、支撑材料(将透明胶带和图像传感器隔开)、双面透明胶带、黑色胶带和偏振片。完整的无透镜偏振计算成像系统实物如图 2(c)所示。图 2(a)中相机的厚度为 25 mm,图 2(c)中无透镜计算成像系统的厚度仅为 5 mm,与图 2(a)中相机的体积相比减少了 1620 mm³,大大减小了相机的厚度和体积。

2.2 计算成像

计算成像是利用信号处理算法对成像系统采集的数据进行图像重建,恢复目标图像的技术。计算成像的主要原理是在入射光场和图像传感器之间设计复杂但可逆的传递函数。图像传感器采集的信号不再构成传统意义上的图像,而是可以用适当的逆算法重建图像的数据。传统的成像技术通过透镜对物体进行聚焦成像,而计算成像技术通过其他光学调制元件替代光学透镜,生成复杂光场,利用算法进行计算重建,恢复出目标真实图像。

计算成像的过程表示为

$$i(x, y) = h(x, y) \times o(x, y), \quad (1)$$

式中: (x, y) 为照片中的位置坐标; $i(x, y)$ 为光电探测器输出的原始图像; $o(x, y)$ 为目标物体的真实图像; $h(x, y)$ 为传递函数。采用点光源的图像(PSF)作为传递函数。利用采集到的信号 $i(x, y)$ 重建物体 $o(x, y)$ 的信息,需要进行求逆反卷积运算,即计算 $i(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 的傅里叶变换,在频域中应用解卷积运算可实现:

$$O(x, y) = I(x, y) / H(x, y), \quad (2)$$

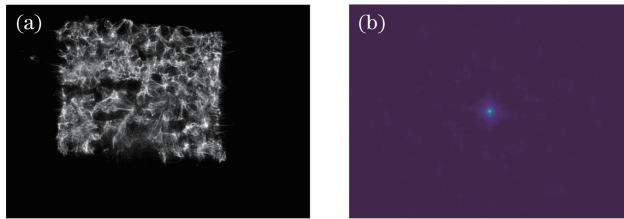


图 3 点光源图像。(a)PSF 校准图像;(b)点光源重建得到的真实图像

Fig. 3 Point light source image. (a) PSF calibration image; (b) real image reconstructed by point light source

将图 3(a)的 PSF 图像同时作为传递函数和物体图像进行图像计算重建,得到点光源的真实图像如图 3(b)所示。由图 3(b)可以看到,重建后得到一个清晰的点光源图像,证明了图 3(a)的 PSF 图像可以作为该相机的传递函数图像,同时证明该成像系统可以使用。

3 实验结果及分析

无透镜偏振计算成像系统,在不添加偏振片的

式中: $O(x, y)$ 、 $H(x, y)$ 和 $I(x, y)$ 分别为 $o(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 、 $i(x, y)$ 的傅里叶变换。对 $O(x, y)$ 进行傅里叶逆变换求解得到卷积信号 $o(x, y)$,即最终想要的真实图像。图像计算重建的过程就是一个非线性求逆运算的过程。逆运算是图像重建中经常用到的一种运算,是通过已知输出和传递函数求解未知输入的一个过程。由于实际计算中,计算量大,复杂度高,并且传递函数并不一定是可逆的,通常利用优化算法求得稳定的近似解。采用添加约束项的最小二乘法进行求解,即

$$\hat{o}_{TV} = \operatorname{argmin} \|i - ho\|_2^2 + \tau \|o\|_{TV}, \quad (3)$$

式中:TV 为总变分正则化,是一种图像重建算法; \hat{o}_{TV} 为最终重建得到的物体真实图像; $\|i - ho\|_2^2$ 为残差范数的平方,衡量解的好坏; $\|o\|_{TV}$ 为图像梯度幅度的和; τ 为调整稀疏度的参数。

2.3 成像系统测试

计算重建的过程需要预先知道传递函数。使用的传递函数为无透镜偏振计算成像系统通过拍摄点光源得到的原始图像(即 PSF)。每个制作好的无透镜偏振计算成像系统,只需要一张 PSF 图像就可以作为传递函数。得到传递函数后即可对制作好的成像系统进行测试。

黑暗环境中,使用点光源照射无透镜偏振计算成像系统,相机采集的图像为焦散图案,就是所需要的 PSF 图像。图 3(a)所示为点光源产生的 PSF 焦散图案。

情况下(称为无透镜计算成像系统)具有普通相机的功能。在手机屏幕上分别显示“E”、“2019”等数字文字以及卡通图片,使用无透镜计算成像系统拍摄手机屏幕,得到的原始图像都类似于图 4。如图 4 所示,从原始图像中看不清目标物体的真实情况,需要进行计算重建,恢复出物体的真实图像。

图 5 为计算重建得到的物体真实图像。通过观察可以看到,无透镜计算成像系统在没有凸透镜的情况下依然可以成功地实现相机拍照的功能。

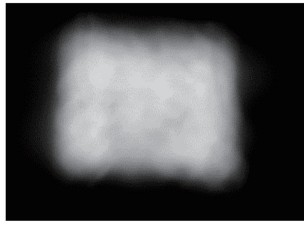


图 4 无透镜计算成像系统得到的原始图像

Fig. 4 Original image obtained with lensless computed imaging system

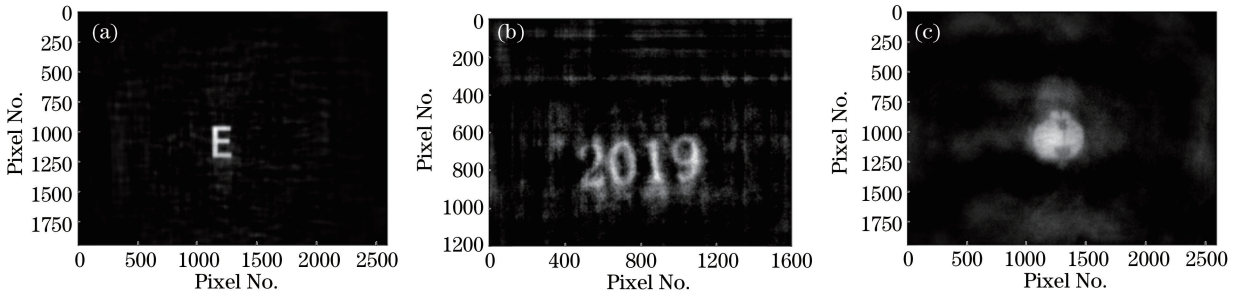


图 5 计算重建后真实图像。(a)字母“E”;(b)数字“2019”;(c)卡通图片

Fig. 5 Real image after computational reconstruction. (a) Letter "E"; (b) digits "2019"; (c) cartoon picture

手机屏幕发出的光为线偏振光,旋转偏振片,使得偏振片的振动方向和手机屏幕的振动方向平行,并将此时偏振片的旋转角度定为 0° 。每隔 5° 旋转

一次无透镜偏振计算成像系统上的偏振片,对同一手机屏幕上的“E”进行拍摄,结果如图 6 和图 7 所示。

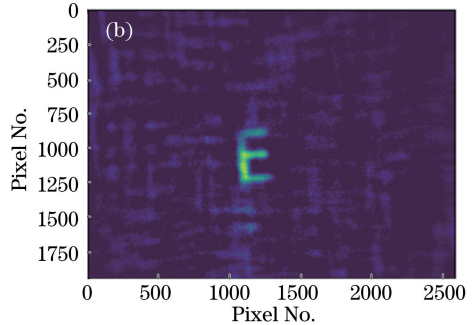
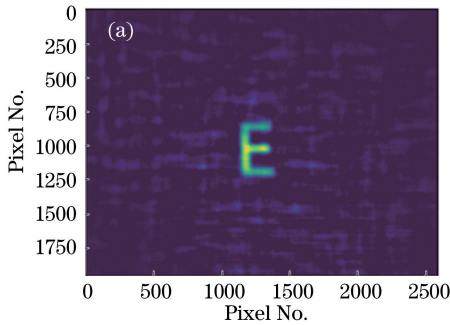


图 6 偏振片在不同旋转角度时的成像结果。(a) 0° ; (b) 20°

Fig. 6 Imaging results of polarizer at different rotation angles. (a) 0° ; (b) 20°

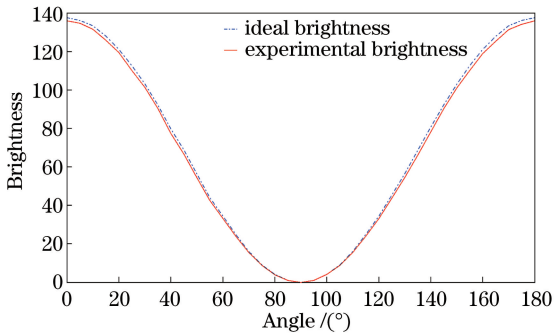


图 7 偏振片不同旋转角度时的图像亮度

Fig. 7 Image brightness when the polarizer has different rotation angles

图 6(a)和 6(b)所示为经过处理重建得到的两张图像。图 6(a)为无透镜偏振计算成像系统的偏振片旋转角度为 0° 时的成像结果,图 6(b)是偏振片旋转角度为 20° 时的成像结果。通过比较可以看到,图 6(b)的亮度比图 6(a)的亮度暗,符合偏振特性。

图 7 所示为无透镜偏振计算成像系统添加不同旋转角度的偏振片时,得到的图像亮度值[灰度值(0~255)代表图像的亮度值]。偏振片角度为 0° 时,照片[图 6(a)所得的“E”]的平均亮度值为 137.5,根据马吕斯定律

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (4)$$

以偏振片旋转角度为 0° 时 $I_0 = 137.5$ 为基础, 计算各个偏振角度 (α) 下的亮度值, 作为理想情况下的亮度值(图 7 中虚线)。实线所示的亮度值为实验得到的实际亮度值, 实验亮度值比理想亮度值偏小一点, 这是因为光在通过偏振片时存在损耗, 偏振片的透过率无法实现 100%, 计算得到其平均透过率为 97.4%, 满足偏振光信息采集时的要求。由图 7 可以看到, 随着偏振片角度的变化, 实验测得的亮度变化满足马吕斯偏振定律, 这证明了无透镜偏振计算成像相机可采集不同偏振方向上的偏振光, 具有偏振相机的性能。

4 结 论

设计的无透镜偏振计算成像系统, 使用双面透明胶带替代传统的凸透镜等光学器件, 并结合偏振片的使用, 利用计算成像技术, 不仅实现了拍照的功能, 还拥有偏振光采集的功能。无透镜偏振计算成像系统具有结构简单、厚度薄、成本低等优点, 为未来相机的发展提供新的方向。

参 考 文 献

- [1] Liu Y Y, Du Y P. Research status and development trend of computational imaging [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2019, 34(5): 21-24.
刘严严, 杜玉萍. 计算成像的研究现状与发展趋势 [J]. *光电技术应用*, 2019, 34(5): 21-24.
- [2] Wei Z Q. Research on lensless coded-mask imaging technology for visible light [D]. Xi'an: Chinese Academy of Sciences, 2018: 1-10.
魏朝奇. 无镜头可见光编码掩模成像技术研究 [D]. 西安: 中国科学院大学, 2018: 1-10.
- [3] Li C H, Cao R F, Xu X Y, et al. Application progress of lensless microscopy imaging technology for point-of-care testing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207018.
李聪慧, 曹若凡, 许夏瑜, 等. 无透镜显微成像技术在即时检测中的应用进展 [J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207018.
- [4] Adams J K, Boominathan V, Avants B W, et al. Single-frame 3D fluorescence microscopy with ultraminiature lensless FlatScope [J]. *Science Advances*, 2017, 3(12): e1701548.
- [5] Kim G, Menon R. Computational imaging enables a "see-through" lens-less camera [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 22826-22836.
- [6] Li W L. A computational photography algorithm for

quality enhancement of single lens imaging deblurring [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 1-33.

李卫丽. 单透镜高质量计算成像技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014: 1-33.

- [7] Antipa N, Necula S, Ng R, et al. Single-shot diffuser-encoded light field imaging [C] // 2016 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), May 13-15, 2016, Evanston, IL, USA. New York: IEEE, 2016: 7492880.
- [8] Yu R. Optical field imaging 3D technology based on microlens array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 5-25.
于荣. 基于微透镜阵列的光场成像 3D 技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 5-25.
- [9] Dai W J. A study on lensless scattering imaging based on LED illumination [D]. Xi'an: Xidian University, 2015: 35-54.
代伟佳. 基于 LED 照明的无透镜散射成像方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 35-54.
- [10] Hao J K, Huang W, Liu J, et al. Review of non-blind deconvolution image restoration based on spatially-varying PSF [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 41-50.
郝建坤, 黄玮, 刘军, 等. 空间变化 PSF 非盲去卷积图像复原法综述 [J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 41-50.
- [11] Liu Z J, Guo C, Tan J B. Lensfree computational imaging based on multi-distance phase retrieval [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1002002.
刘正君, 郭澄, 谭久彬. 基于多距离相位恢复的无透镜计算成像技术 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1002002.
- [12] Wang D P, Xie M Y, Li Z B, et al. Research on reconstruction algorithm of lensless microscopic imaging [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(4): 589-595.
王丹萍, 谢梦圆, 李志斌, 等. 无透镜显微成像的重构算法研究 [J]. *应用光学*, 2019, 40(4): 589-595.
- [13] Wang X H, Hao J K, Huang W, et al. Image restoration and reconstruction based on simple lenses computational imaging [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(3): 965-972.
王新华, 郝建坤, 黄玮, 等. 基于简单透镜计算成像的图像复原重建 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2017, 47(3): 965-972.

[14] Lei S, Chen L, He X F, et al. Lensless Fourier transform digital holography based on polarization image fusion and optical fiber[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2013, 34(2): 143-

146.

雷莎, 陈丽, 何贤飞, 等. 基于光纤和偏振图像融合的无透镜傅里叶变换数字全息[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(2): 143-146.