

文章编号 1004-924X(2023)16-2333-10

基于消色差透镜的单像素与计算关联光谱成像

孙景浩¹, 杨照华^{1,2*}, 吴云³, 吴令安⁴, 余远金^{5*}

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

3. 北京控制工程研究所, 北京 100190;

4. 中国科学院物理研究所, 北京 100190;

5. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

摘要:光谱成像系统受色差影响会导致图谱混叠, 本文将单像素成像以及计算关联成像分别与光谱成像系统相结合, 并在系统中引入 900~1 700 nm 适用的消色差透镜来校正色差。首先计算出不同胶合消色差透镜的色差大小并以此选取透镜, 所选消色差透镜相较其它透镜对色差校正可以提高一个量级。其次分析了色差对光谱成像系统的影响以及单像素成像和计算关联成像的差异。最后仿真和试验分析单像素光谱成像和计算关联光谱成像特点。试验结果表明对于 900~1 700 nm 的近红外光谱成像, 基于消色差透镜的单像素光谱成像系统取得了更好的图像重构结果, 其峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 提高了 3.93 dB, 结构相似度 (Structural Similarity, SSIM) 提高了 0.96%。消色差透镜的单像素光谱成像系统在近红外光谱成像中重构图像效果优于无消色差透镜的计算关联光谱成像。

关键词:光谱成像; 单像素成像; 计算关联成像; 色差校正; 近红外光

中图分类号: 文献标识码: A doi:10.37188/OPE.20233116.2333

A single-pixel and computational ghost spectral imaging system based on achromatic lens

SUN Jinghao¹, YANG Zhaohua^{1,2*}, WU Yun³, WU Ling'an⁴, YU Yuanjin^{5*}

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;

4. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

5. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: yangzh@buaa.edu.cn; yuanjin.yu@bit.edu.cn

Abstract: The influence of chromatic aberration in a spectral imaging system leads to spectral overlap of

收稿日期: 2023-03-08; 修订日期: 2023-04-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61973018, No. 62173039, No. 61975229); 民用航天技术预先研究项目 (No. D040301); 北京控制工程研究所空间光电测量与感知实验室开放基金资助 (No. LabSOMP-2022-04)

an image. This study combines single-pixel imaging and computational ghost imaging in a spectral imaging system, with an achromatic lens of 900-1 700 nm focal length to correct for chromatic aberration. First, the chromatic aberration of achromatic lenses made of different materials was calculated, and a suitable lens was selected accordingly; its aberration-correction was improved by an order of magnitude compared with other lenses. Second, the effects of chromatic aberration on spectral imaging systems and the differences between single-pixel imaging and computational ghost imaging were analyzed. Finally, two spectral imaging systems were compared through simulation and experimental analysis. The experimental results indicate that in the 900-1 700 nm wavelength range, the single-pixel spectral imaging system based on an achromatic lens achieves better image reconstruction results, with peak signal-to-noise ratio (PSNR) and structural similarity (SSIM) improvements of 3.93 dB and 0.96%, respectively. Simulations and experiments verify that the near-infrared single-pixel spectral imaging system based on an achromatic lens performs better than computational ghost spectral imaging.

Key words: spectral imaging; single-pixel imaging; computational ghost imaging; chromatic aberration correction; near-infrared light

1 引言

单像素成像(Single-Pixel Imaging, SPI)作为一种新型的计算成像方式,具有灵敏度高、响应范围广、光路简单等特点,已经在诸多领域展现了极大的应用前景。单像素成像主要由桶探测器和空间光调制器两部分组成。其核心是使用一系列特定的掩膜序列对场景进行调制,然后使用桶探测器收集与掩膜序列对应的一维探测信号,最后将掩膜信息和与之对应的探测信息经过图像重构处理得到场景的二维信息^[1-4]。与传统的阵列探测器相比,桶探测器没有空间分辨率,但可以在极低的光通量下探测到信号。然而,单像素成像需要多次测量来进行图像重构,这增加了成像时间。2006年,Candes和陶哲轩等人提出压缩感知理论(Compressed Sensing, CS),为单像素成像和压缩成像打下了理论基础^[5]。2008年,雪城大学的Duarte等人正式提出单像素成像的概念^[6],单像素成像可使用压缩感知方法进行图像重构。

另一种与单像素成像类似的成像方式为鬼成像(Ghost Imaging, GI),最初是利用量子纠缠性质来对物体进行成像,也称为双光子纠缠成像^[7]。随后在试验中使用经典光源来代替量子纠缠光源仍然成功进行了鬼成像的试验,也称为赝热光鬼成像^[8]。2008年麻省理工的Shapiro等人提出计算鬼成像(Computational Ghost Imaging,

CGI)^[9],该成像光路与同年提出的单像素相机大体一致,区别在于空间光调制器和目标物体在光路中的先后顺序。也有研究者们将鬼成像中这种调制光打到目标物体上的成像方式称为结构化照明(Structured Illumination),而在经典的单像素成像光路中,光经过目标物体后再由空间光调制器调制的这种方式被称为结构化探测(Structured Detection),二者在成像原理、调制策略和重构方法具有很强的相似性,试验上可使用完全相同的试验设备如光源、空间光调制器和桶探测器来完成。

单像素和CGI的光谱成像(Spectral Imaging)是通过记录物体上每一个像素点的多个谱段的光强数据,结合调制散斑场用以构建图谱数据立方体,可以理解为大量具有空间分布的光谱曲线^[10-13]。高光谱分辨率对于宽光谱成像中目标的精确识别十分重要,但很难同时获得高光谱分辨率和高空间分辨率^[14]。单像素光谱成像^[15-19]为解决这一问题提供了新的方法,可以实现宽光谱或高光谱成像。

本文提出了一种近红外光谱成像色差校正的方案,在系统中引入近红外波段适用的消色差透镜作为成像透镜,光谱仪作为单像素传感器来降低色差对光谱成像系统的影响。通过理论计算、仿真分析和对照试验,验证了该方案的消色差能力,可以提高重构图像质量。通过计算重构图像的峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio,

PSNR) 以及结构相似度 (Structural Similarity, SSIM) 得出采用消色差透镜的单像素光谱成像系统与计算关联光谱成像相比, 重构图像的峰值信噪比提高了 3.93 dB。仿真和试验验证了基于消色差透镜的单像素光谱成像系统在近红外光谱成像中重构图像效果优于计算关联光谱成像。

2 理论分析

2.1 传统光学系统色差分析

一般的光学系统由于光学材料对不同波长的光有不同的折射率, 当宽光谱的混合光射入单个薄透镜, 不同谱段的光具有不同的传播途径因而无法会聚与一点, 使得物体的图像在光轴上任意位置均存在图谱混叠, 形成一个个的弥散斑而无法清晰成像。

图 1 展示了色差形成的原理。从 A 点发出的宽谱光经过透镜后, 其中的单色光 F, D, C 分别交于光轴上的 A'_F, A'_D, A'_C 。其中 F 光和 C 光在近轴上的成像位置偏差即为位置色差。若 F 光和 C 光的位置偏差为 0, 也就是不存在位置色差, 一般是在理想光学系统下。为了尽可能地消除色差对光谱成像系统的影响, 需要引入相应的结构进行优化。通常选取 D 光作为参考波长, 使得 F 光和 C 光在光轴上的成像位置尽可能与 D 光一致。F 光和 C 光的位置色差用式(1)表示:

$$\Delta L'_{FC} = L'_F - L'_C = -\sum_i h^2 \frac{\varphi_i}{n_i'^2 u_i'^2}, \quad (1)$$

其中: h 是物体在每个镜面上的投影高度, n' 和 u' 是像方介质的折射率和孔径角, φ_i 和 ν_i 是每个透

镜的光焦度和阿贝数。为了尽可能的消除色差, 式(1)中等式右边的 $\sum_i h^2 \frac{\varphi_i}{\nu_i}$ 应尽可能趋于 0。从式(1)可以推断出, 单只透镜不具备色差校正能力, 因为其光焦度 φ 永远是一个非零的常数, 但它可能是正常数或负常数; 还可以推断出凸透镜具有负的色差而凹透镜具有正的色差。这意味着可以选取合适的凸透镜和凹透镜胶合来校正色差。该透镜可以减小斑点尺寸, 减小球差, 对特定波长可以实现最小色差^[20]。根据薄透镜的消色差条件:

$$\Phi_+/V_+ + \Phi_-/V_- = 0. \quad (2)$$

和光焦度组合公式:

$$\Phi = \Phi_+ + \Phi_-. \quad (3)$$

可以求出:

$$\Phi_+ = V_+ \Phi / (V_+ - V_-), \quad (4)$$

$$\Phi_- = V_- \Phi / (V_- - V_+), \quad (5)$$

其中: Φ 为消色差透镜的光焦度, Φ_+, Φ_- 分别为正、负透镜的光焦度, V_+, V_- 为阿贝数。构成消色差透镜的正、负透镜光焦度需满足式(4)和(5), 即可校正初级色差。但是对于高分辨率的成像系统来说, 由于谱段较宽, 还需要考虑二级色差的影响。对 900~1 700 nm 的近红外谱段, 采用消色差透镜可以校正 900 nm 和 1 700 nm 的色差, 使其在光轴上尽可能重合, 但不可避免地还会对其他波长的光线产生影响, 因此需要校正二级色差。根据公式(6):

$$\Delta L = -\frac{1}{\Phi} \Delta \varphi = -f^* \frac{P_+ - P_-}{V_+ - V_-}, \quad (6)$$

其中: ΔL 为二级色差的大小, $\Delta \varphi$ 为密接薄透镜组的色差之和, f 为系统的焦距, P_+, P_- 分别为正、负透镜的部分色散。可知对于焦距一定的光学系统, 二级色差的大小与系统结构参数无关, 完全由玻璃的色散特性决定。根据光学系统校正二级色差和其他像差的要求, 选择谱线 900 nm 和 1 700 nm 作为消色差谱线, 1 300 nm 为消单色像差谱线, 则修正的部分色散(P)和阿贝数(V)的表达式为:

$$V_{\lambda_2} = \frac{n_{\lambda_2} - 1}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_3}}, \quad (7)$$

$$P_{\lambda_2} = \frac{n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_3}}, \quad (8)$$

其中: $\lambda_1 = 900 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1300 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 1700 \text{ nm}$,

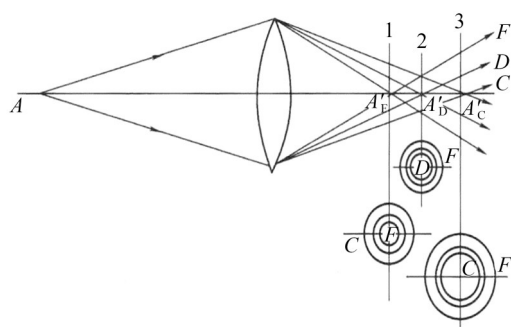


图 1 色差示意图

Fig. 1 Schematic of chromatic aberration

n 为玻璃的折射率。计算各种玻璃在 900~1 700 nm 波段的部分色散和阿贝数,并用表 1 所示。色差校正时通常用色散小的冕牌玻璃作正透镜,色散大的火石玻璃作负透镜。但根据修正后的部分色散和阿贝数可以看出这两种类型的玻璃在 900~1 700 nm 的近红外波段其色散特性会发生变化,部分冕牌玻璃的色散变大并接近火石玻璃甚至高于火石玻璃。基于此要校正二级光谱,选择近红外波段下的高折射率高色散或低折射率低色散的材料作正透镜($n_{1300} > 1.6, V_{1300} > 50$; $n_{1300} < 1.6, V_{1300} > 55$),高折射率低色散的材料作负透镜($n_{1300} > 1.6, V_{1300} < 50$)并且二者阿贝数相差较大、部分色散相同或相近的玻璃进

行胶合^[21]。符合条件的正透镜玻璃材料有:H-K9,Bak4和N-LAK22,负透镜有:H-ZF2,FD10,N-SF6和N-SF66。设光学系统的焦距为 100 mm,考虑到工作环境以及玻璃的稳定性等因素,选用玻璃 H-K9 和 H-ZF2 组合消色差,根据公式(6)计算二级光谱的色差大小:

$$\Delta L_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3} = -f^* \frac{P_{H-K9} - P_{H-ZF2}}{V_{H-K9} - V_{H-ZF2}} = 0.24 \text{ mm.} \quad (9)$$

当 $\lambda_1=900 \text{ nm}, \lambda_2=1300 \text{ nm}, \lambda_3=1700 \text{ nm}$ 时光学系统的二级光谱色差为 0.24 mm,相较于其他几种玻璃材料进行胶合的消色差透镜效果是最优的,色差校正最高可以提升一个量级,因此选用 H-K9 和 H-ZF2 胶合的消色差透镜。

表 1 玻璃色散特性分析

Tab. 1 Characteristics of glass dispersion

玻璃牌号	n_{900}	n_{1300}	n_{1700}	部分色散(P_{1300})	阿贝数(V_{1300})
H-K9	1.508 72	1.504 09	1.500 34	0.552 5	60.15
H-K9L	1.509 08	1.503 83	1.498 96	0.519 8	49.79
Bak4	1.559 38	1.554 94	1.549 43	0.446 2	55.77
N-LAK22	1.641 33	1.633 94	1.629 15	0.606 7	52.04
N-LAK44	1.684 82	1.679 35	1.669 67	0.361 1	44.84
H-ZF2	1.655 15	1.647 08	1.641 35	0.584 8	46.89
FD10	1.706 86	1.696 78	1.689 99	0.597 5	41.30
N-SF6	1.782 64	1.768 86	1.761 20	0.642 7	35.86
N-SF66	1.887 64	1.872 51	1.862 88	0.611 1	35.24
H-QK3L	1.483 29	1.476 85	1.470 89	0.519 4	38.46
LAF3	1.705 25	1.694 73	1.692 05	0.811 1	52.63
FK3	1.458 44	1.454 54	1.449 52	0.437 2	50.96
BK7	1.509 57	1.503 90	1.499 18	0.545 7	49.04
F2	1.605 57	1.598 43	1.593 17	0.575 8	48.26
ZK1	1.524 86	1.519 09	1.514 96	0.582 8	52.43
K7	1.503 19	1.497 92	1.493 78	0.560 1	52.91

2.2 光谱成像系统色差分析

光谱成像是通过记录每个像素在多个谱段上的光谱信息和图像信息组合而成的一种成像技术。它通过收集目标的反射光谱,将其分散为一系列波长,并在每个波长处获取图像信息,从而获得包含光谱信息和空间信息的图谱数据立方体。图谱数据立方体可以理解大量具有空

间分布的光谱曲线,也可以认为是一系列波长或波段不同的强度图像。将 SPI 和 CGI 分别与光谱成像系统相结合,如图 2 所示。图 2(a)为单像素光谱成像系统原理图,光源发出的光经物体反射后,由成像透镜成像至数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD),再经过收集透镜后被光谱仪采集。而计算关联光谱成像是先将光

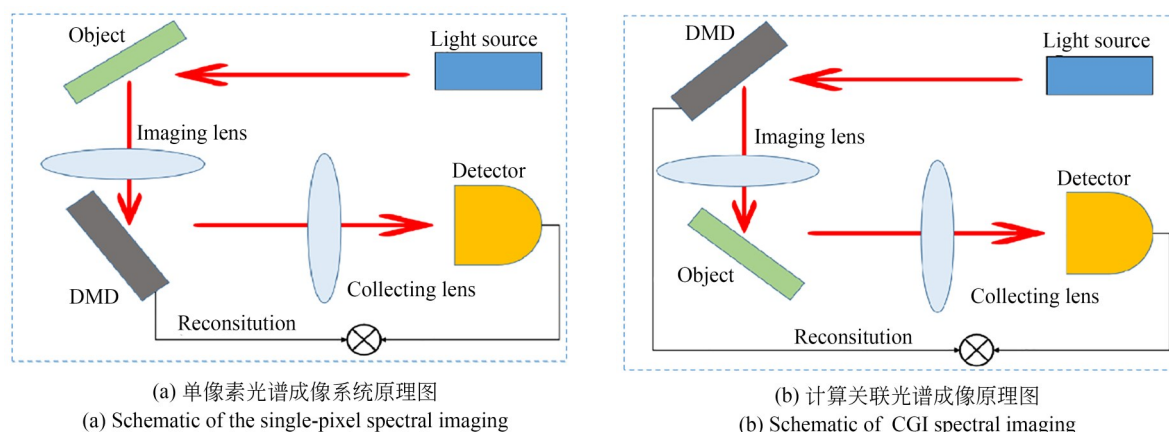


图 2 SPI 和 CGI 分别与光谱成像系统相结合

Fig. 2 Schematics of SPI/CGI spectral imaging

源发出的光打在 DMD 上,经 DMD 调制后的光打在物体上再经收集透镜后被光谱仪采集。由于改变了光场调制的先后顺序以及受成像器件等因素的影响,使得 SPI 系统的光通量利用率高于 CGI 系统^[22]。此外,光谱成像系统中每一个谱段都存在色差,使得构建的光谱数据立方体出现错位和各谱段尺寸不一致的情况,光谱图像重构质量无法得到保证。具体表现为重构图像部分缺失、边缘模糊、重构图像与待测目标出现尺

寸不匹配以及光谱准确度低等问题。因此将 SPI 与光谱成像系统结合能够得到更好的重构图像。

3 仿真分析

为证实所选消色差透镜相比单透镜对于色差有良好的校正,本文进行了一系列模拟。两组透镜的直径和焦距分别为 30 mm 和 50 mm,图 3 显示了两种透镜的总体布局、横向色差曲线和色

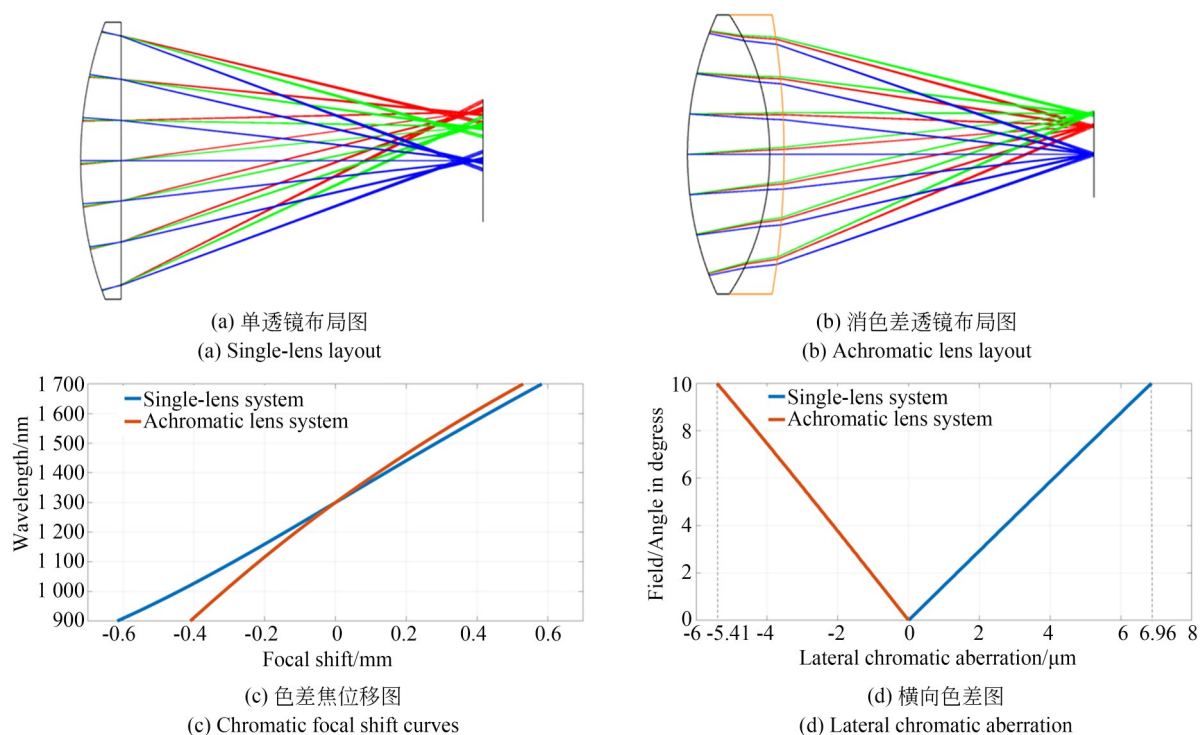


图 3 单镜头和消色差镜头的对比

Fig. 3 Comparison of the single-lens and achromatic lens

差焦位移曲线。图 3(a)和图 3(b)分别为单凸透镜和消色差透镜的布局图,图中颜色表示不同角度的入射光线。分析发现基于单凸透镜的成像系统在入射角发生变化时像点无法会聚于同一像面上,而基于消色差透镜的成像系统能够使像点会聚于同一像面上。随后用横向色差和色差焦位移来进一步比较。横向色差即为垂轴色差,当系统的位置色差得到校正,则垂轴色差也会相应的得到校正,因此可以用垂轴色差来衡量色差的大小。横向色差通常由视场中与垂直轴的最大偏差来表示,偏差值越小则系统的色差也越小。色差焦位移是由给定波长范围内焦点位置之间的最大差来表示不同波长下的焦距变化。如图 3(c)和 3(d)所示,在 900~1 700 nm 的波长范围内,消色差透镜系统的横向色差的绝对值仅为单透镜系统的 7/9,相应的色差焦位移为 2/3。仿真得出消色差透镜对 900~1 700 nm 的近红外光谱成像具有良好的色差校正。

随后以红外相机(国惠 GH-SW640 相机)拍得 1 550 nm 波段图片作为原图进行仿真分析,比较两个成像系统之间的差异。原图分辨率大小调整为 64×64 像素,采用自然序哈达玛矩阵生成的 4096 张散斑序列对图片进行调制,将调制后的信号作为桶探测值,运用差分关联成像算法(Differential Ghost Imaging, DGI)将桶探测器值与散斑序列进行逆关联运算重构图片。DGI 算法是采用经差分后的桶探测器值代替总光强值,然后与目标物体的信号进行关联运算。DGI 的重构过程可以用函数表示^[23]:

$$G(x)_{DGI} = \langle S_B I_R(x) \rangle - \frac{\langle S_B \rangle}{\langle S_R \rangle} \langle S_R I_R(x) \rangle, \quad (10)$$

其中: S_B 为桶探测器信号值, S_R 为参考探测器信号值, $I_R(x)$ 表示参考臂光场分布, $\langle \dots \rangle$ 表示求系综平均。重构图像的 PSNR 可通过如下公式计算^[22]:

$$PSNR = 20 \lg \left(\frac{2^n - 1}{MSE} \right), \quad (11)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_o(i,j) - I(i,j))^2, \quad (12)$$

其中: n 为像素的位深,MSE 为均方误差由公式

(12) 计算得出。其中, $I_o(i,j)$ 表示原始图像, $I(i,j)$ 表示重构图像, M,N 表示图像的二维大小。仿真结果如图 4 所示,理想条件下两个成像系统重构结果一样,都能获得较高的 PSNR;当加入同等水平的高斯噪声模拟系统的随机噪声时,可以明显看到 SPI 系统重构的图像更为清晰,而 CGI 系统重构的图像则比较模糊,丢失大部分信息。

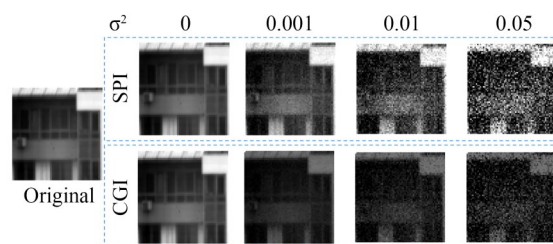


图 4 SPI 和 CGI 重构结果对比

Fig. 4 Comparison of SPI and CGI reconstruction results

表 2 为 SPI 和 CGI 系统重构图像的 PSNR。其中高斯噪声的均值都为 0,方差分别为 0.001, 0.01 和 0.05。随着方差 σ^2 的增大,重构图像的 PSNR 都逐渐降低,CGI 相比 SPI 的下降趋势更明显。随后对 900~1 700 nm 的其他波段进行了同样的仿真,尽管成像结果在不同波段上可能有轻微的差异,但是仿真结果都是相同的。可得 SPI 系统相比 CGI 系统在近红外的成像效果更好。

表 2 SPI 和 CGI 重构图像的峰值信噪比

Tab. 2 PSNR of SPI and CGI reconstructed images(dB)

	SPI	CGI
σ^2 is 0	64.03	64.03
σ^2 is 0.001	30.04	13.23
σ^2 is 0.01	20.49	12.91
σ^2 is 0.05	14.36	12.31

4 试验验证

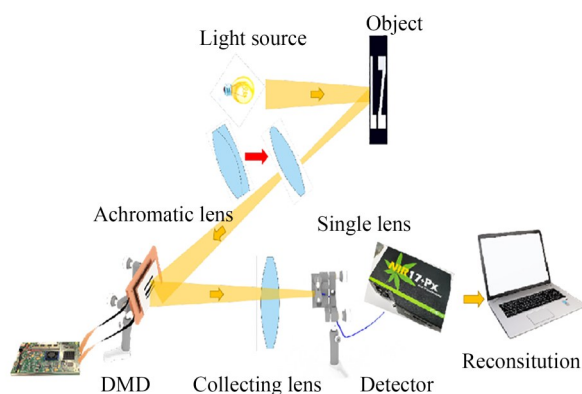
随后分别进行了基于消色差透镜的单像素光谱成像试验和计算关联光谱成像试验,通过

比较在相同环境条件下不同谱段重构图像的质量来验证。试验系统如图 5 所示。图 5(b)为单像素光谱成像系统的试验装置图,图中光源是红外大灯(900~1 700 nm)经物体反射后,由消色差透镜成像到 DMD (ViALUX V-7001, 1 024×768) 的接收面。由上位机预先加载至 DMD 上的编码信息调制后,光束通过收集透镜后最终收集到光谱仪(复享光学 NIR-17+Px, 900~1 700 nm)中。图 5(d)为计算关联光谱成像系统的试验装置图,图中光源经 DMD 调制后,由消色差透镜成像在物体上,随后经收集透镜最终被光谱仪收集。在此试验中,DMD 加载的是由自然序哈达玛矩阵生成的 4 096 张散斑序列来调制,将散斑序列与光谱仪探测到的信号进行关联逆运算,运用 DGI 算法可以重构出物体的图像。试验结果如图 6 所示。图 6(a)为

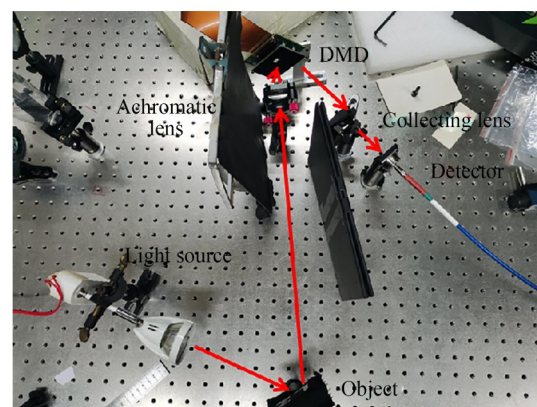
重构结果,对 900~1 700 nm 谱段间隔 100 nm 选取重构图像进行分析,可以看到单像素光谱成像能够完整的重构目标物体,而 CGI 光谱成像无法完整重构目标物体,重构图像边缘模糊、丢失物体的大部分信息;此外,采用消色差透镜使得重构图像更加清晰。为了更加直观的比较重构图像的质量,计算其 PSNR 和 SSIM 并绘制曲线如图 6(b)和 6(c)表示。SSIM 可由下式计算^[22]:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}, \quad (13)$$

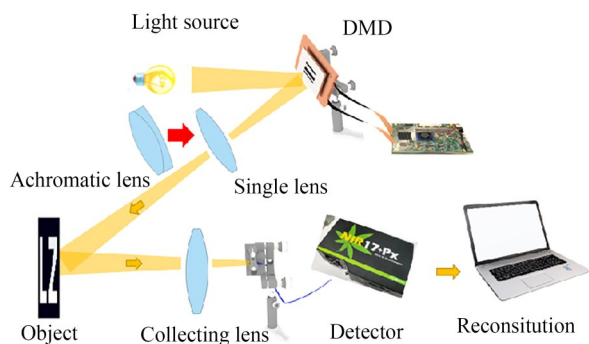
式(13)中, μ_x 表示图像 x 的平均值, μ_y 表示图像 y 的平均值, σ_x^2 表示图像 x 的方差, σ_y^2 表示图像 y 的方差, σ_{xy} 表示图像 x 和图像 y 的协方差, c_1, c_2 是用来维持稳定的常数。



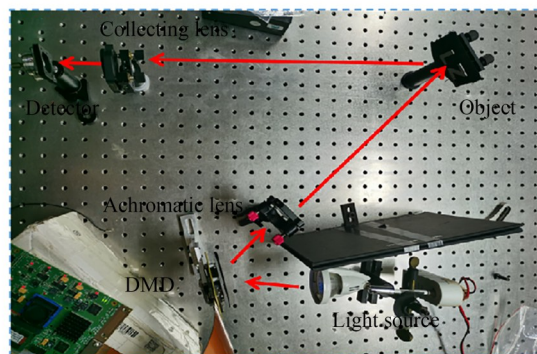
(a) 单像素光谱成像系统原理图
(a) Schematic of single-pixel spectral imaging system



(b) 单像素光谱成像系统试验装置图
(b) Experimental setup of single-pixel spectral imaging system



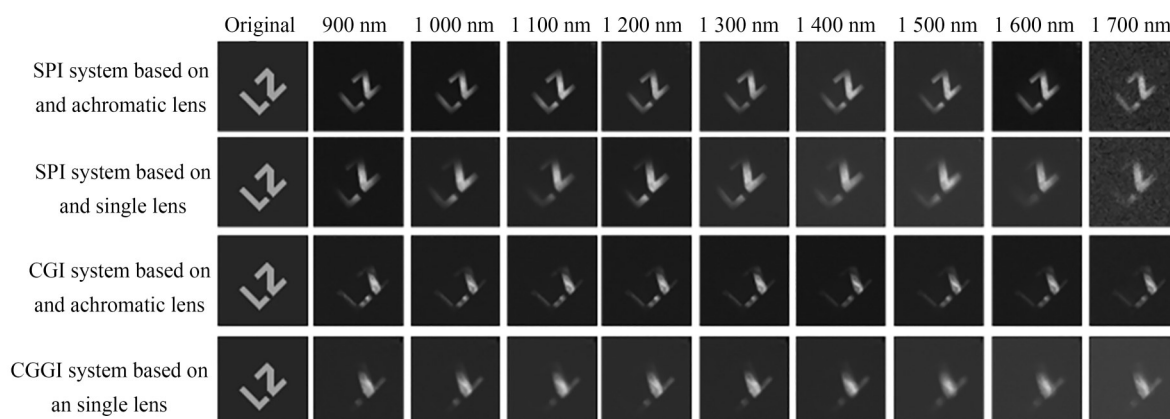
(c) 计算关联光谱成像系统原理图
(c) Schematic of computational ghost spectral imaging system



(d) 计算关联光谱成像系统试验装置图
(d) Experimental setup of computational ghost spectral imaging system

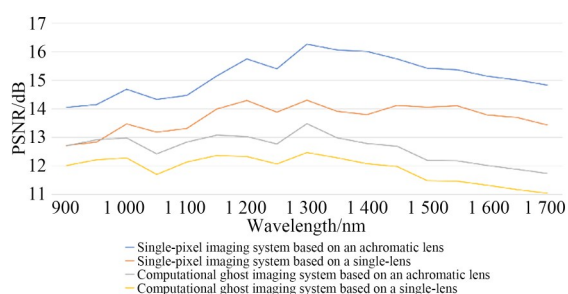
图 5 单像素光谱成像试验和计算关联光谱成像试验

Fig. 5 Single-pixel spectral imaging experiments and computational spectral imaging experiments



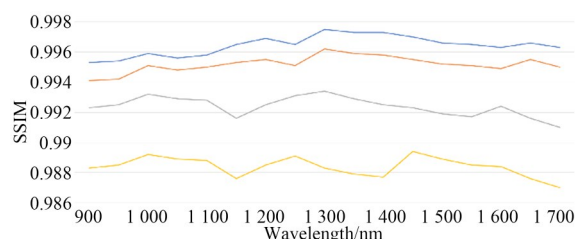
(a) 近红外宽光谱在不同方案下的重构结果

(a) Refactoring results of near-infrared multispectral imaging under different schemes



(b) 重构图像PSNR

(b) PSNR diagram of reconstructed images



(c) 重构图像SSIM

(c) SSIM diagram of reconstructed images

图6 重构试验结果

Fig. 6 Experimental results of reconstruction

通过比较可得采用消色差透镜的单像素光谱成像相比CGI光谱成像,重构图像的PSNR最多能提高3.93 dB,最少能提高1.93 dB,平均提高了3.29 dB,SSIM最多能提高0.96%,最少能提高0.67%,平均提高了0.81%。在同等试验条件下,仅仅改变了消色差透镜和单凸透镜,并且两个透镜在系统中只起到色差校正的作用,试验光路并未进行改变。经过多次试验证实了SSIM的提高是由于色差校正引起的,并非试验误差。此外,系统的噪声也会对成像结果产生影响。SPI和CGI的噪声包括系统噪声和随机噪声。在系统噪声比较中,试验环境及成像器件条件一样的情况下CGI的光通量低于SPI,使得信噪比降低,因此重构的图像并不完整,丢失物体的部分信息,结果较差。在随机噪声比较中,用高斯噪

声来模拟系统的随机噪声,得出试验结果与仿真结果一致。

5 结 论

为降低色差对光谱成像系统影响,本文提出了一种基于色差校正的近红外光谱成像方案,通过理论计算、数值仿真以及对照试验研究了单像素光谱成像与CGI光谱成像的差异。试验结果表明:对于900~1700 nm的近红外光谱成像,基于消色差透镜的单像素光谱成像的成像效果更好,其峰值信噪比最大可提高3.93 dB,结构相似度最大可提高0.96%。试验结果表明近红外光谱成像中采用单像素成像系统是一种更好的光谱成像方案。

参考文献:

- [1] KANNO H, MIKAMI H, GODA K. High-speed single-pixel imaging by frequency-time-division multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2339-2342.
- [2] QIU Z, ZHANG Z, ZHONG J. Comprehensive comparison of single-pixel imaging methods[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106301.
- [3] YANG W, YIN K, SHI D, *et al.* Single pixel imaging via sparse projection angle sampling[J]. *Optics Communications*, 2021, 499: 127284.
- [4] YANG X, JIANG P, JIANG M, *et al.* High imaging quality of Fourier single pixel imaging based on generative adversarial networks at low sampling rate [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106533.
- [5] CANDÈS E, ROMBERG J. Sparsity and incoherence in compressive sampling [J]. *Inverse Problems*, 2007, 23(3): 969-985.
- [6] DUARTE M F, DAVENPORT M A, TAKHAR D, *et al.* Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83-91.
- [7] PITTMAN T B, SHIH Y H, STREKALOV D V, *et al.* Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [8] BENNINK R S, BENTLEY S J, BOYD R W. “Two-photon” coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [9] SHAPIRO J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [10] QI Y, LI L, ZHOU G, *et al.* A single-pixel hyperspectral imager using two-stage Hadamard encoding [J]. *Optics Communications*, 2020, 470: 125813.
- [11] WANG Y W, SUO J L, FAN J T, *et al.* Hyperspectral computational ghost imaging via temporal multiplexing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(3): 288-291.
- [12] WU J R, LI E R, SHEN X, *et al.* Experimental results of the balloon-borne spectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 68740-68748.
- [13] ZHANG H, MA X, ARCE G R. Compressive spectral imaging approach using adaptive coded apertures[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(7): 1924-1938.
- [14] 高泽东, 高洪兴, 朱院院, 等. 快照式光谱成像技术综述[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(6): 1323-1343.
GAO Z D, GAO H X, ZHU Y Y, *et al.* Review of snapshot spectral imaging technologies[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1323-1343. (in Chinese)
- [15] JIN S L, HUI W W, WANG Y L, *et al.* Hyperspectral imaging using the single-pixel Fourier transform technique[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45209.
- [16] LI Z W, SUO J L, HU X M, *et al.* Efficient single-pixel multispectral imaging via non-mechanical spatio-spectral modulation[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41435.
- [17] MONAKHOVA K, YANNY K, AGGARWAL N, *et al.* Spectral DiffuserCam: lensless snapshot hyperspectral imaging with a spectral filter array [J]. *Optica*, 2020, 7(10): 1298.
- [18] ZHANG Z B, LIU S J, PENG J Z, *et al.* Simultaneous spatial, spectral, and 3D compressive imaging via efficient Fourier single-pixel measurements[J]. *Optica*, 2018, 5(3): 315.
- [19] 赵梓栋, 杨照华, 李高亮. 基于测量基优化的低采样率单像素成像[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(5): 1008-1013.
ZHAO Z D, YANG Z H, LI G L. Sub-Nyquist single-pixel imaging by optimizing sampling basis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(5): 1008-1013. (in Chinese)
- [20] 王美钦, 王忠厚, 白加光. 宽谱段光学系统消二级光谱的设计[J]. *应用光学*, 2010, 31(3): 360-364.
WANG M Q, WANG ZH H, BAI J G. Removing secondary spectrum in wide spectrum optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 360-364. (in Chinese)

[21] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京:科学出版社, 1965.

WANG ZH J. *Theoretical Basis of Optical Design* [M]. Beijing: Science Press, 1965. (in Chinese).

[22] 孙宇哲. 基于DMD调制的高信噪比计算关联成

像方法研究及应用[D]. 北京:北京航空航天大学, 2019.

[23] FERRI F, MAGATTI D, LUGIATO L A, *et al.* *Differential Ghost Imaging* [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.

作者简介:



孙景浩(1997—),男,甘肃白银人,硕士研究生,2023年于兰州理工大学获得硕士学位,主要从事鬼成像的研究。E-mail:920464069@qq.com

通讯作者:



余远金(1985—),男,教授,博士生导师,2015年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事关联成像探测及应用,导航、制导与控制研究。E-mail: yuanjin.yu@bit.edu.cn

通讯作者:



杨照华(1975—),女,研究员,博士生导师,1998年、2004年于哈尔滨工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事光学成像探测及应用的研究。E-mail: yangzh@buaa.edu.cn