

# 基于特殊 RGB 排列的彩色 LED 阵列计算鬼成像

黄宏旭, 李立京, 孙鸣捷\*

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 图像的低质量一直是制约计算鬼成像(CGI)技术应用的重要问题,因此,针对 CGI 系统的彩色发光二极管(LED)阵列设计了一种特殊的 RGB(Red,Green,Blue)排列方式。首先,自主开发了一个  $64 \times 64$  的彩色 LED 阵列为 CGI 系统提供结构照明;然后,将 LED 阵列上的芯片按设计的篮织排列方式进行排列;最后,考虑到彩色 LED 阵列的物理结构,提出了一种针对采样图像的插值算法。实验结果表明,相比笛卡儿采样方式,篮织采样方式的均方根误差(RMSE)降低了 4.6%,在存储彩色图像高频信息方面的性能更好。相比双线性插值算法和双三次插值算法,本算法的平均 RMSE 分别降低了 2.0% 和 6.4%。

**关键词** 图像处理; 计算鬼成像; 篮织排列; 笛卡儿排列; 插值算法

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011025

## Computational Ghost Imaging Based on Chromatic LED Array with Special RGB Arrangement

Huang Hongxu, Li Lijing, Sun Mingjie\*

School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** Low quality of images is a critical problem that inhibits the application of computational ghost imaging (CGI) technology. Therefore, a special RGB (Red, Green, Blue) arrangement is designed for the chromatic light-emitting diode (LED) array of the CGI system in this study. First, a  $64 \times 64$  chromatic LED array is independently developed to provide structural lighting for the CGI system. Then, the chips on the LED array are arranged according to a designed basket-weave arrangement. Finally, considering the physical structure of the chromatic LED array, an interpolation algorithm is proposed for sampled images. Experiment results show that the root mean square error (RMSE) of the basket-weave sampling is reduced by 4.6%, compared with Cartesian sampling and it has better performance in storing high-frequency information of chromatic images. In addition, compared with the bilinear and bicubic interpolation algorithms, the average RMSE of the algorithm is reduced by 2.0% and 6.4%, respectively.

**Key words** image processing; computational ghost imaging; basket-weave arrangement; Cartesian arrangement; interpolation algorithm

**OCIS codes** 100.2000; 110.1758; 110.3010

## 1 引言

传统数码相机通常用传感器阵列记录焦平面上场景的光强信息,而计算鬼成像(CGI)技术<sup>[1-2]</sup>先用

空间光调制器照亮一个场景,再用一个单像素探测器测量从场景透射或反射的光强,最后结合调制光场的信息和已知光强数据重建出场景图像。虽然 CGI 技术在可见光谱上的表现不如传统数码相机,

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-02-17; 录用日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(61922011)、之江实验室开放课题(2021MC0AB03)

\* E-mail: mingjie.sun@buaa.edu.cn

但在多光谱成像<sup>[3-5]</sup>和三维(3D)成像<sup>[6-8]</sup>领域具有广泛的应用前景。人们为 CGI 技术的应用提出了多种方案,如压缩感知<sup>[9-14]</sup>、时间鬼成像<sup>[15-18]</sup>、多像素鬼成像<sup>[19-20]</sup>。本课题组在之前的工作中提出了一种基于高速 LED 阵列的 CGI 系统<sup>[21-24]</sup>,获得了分辨率为 32 pixel×32 pixel 的灰度图像,但提高彩色图像的分辨率和质量依然是 CGI 技术中亟需解决的问题。

已有研究虽然确定了传统笛卡儿排列是光学采样的最佳选择<sup>[25]</sup>,但采样方式的适度不规则特性可提高系统对高频彩色信息的存储能力。因此,本文提出了一种篮织采样方法。为了验证该采样方法的有效性,自主开发了一个分辨率为 64 pixel×64 pixel 的彩色 LED 阵列,该阵列中的芯片采用篮织方式排列。借助高速数字采集器,用该成像系统对具有复杂细节的彩色图像进行成像,实现了分辨率为 64 pixel×64 pixel 的彩色 CGI。实验结果表明,相比笛卡儿采样方式,篮织采样方式的 LED 芯片重建图像的均方根误差(RMSE)较低。此外,通过对 LED 阵列的精确建模以及设计的针对性插值算法,可获得更精确的重建图像和更低的 RMSE。

## 2 基本原理

### 2.1 基于单色 LED 阵列的计算鬼成像原理

基于单色 LED 阵列的 CGI 系统中,用高速

LED 照明模块产生调制光场  $E_v$ ,其中,  $v$  为调制次数。成像透镜将被调制的光投影到物体平面,然后由一个单像素探测器记录物体反射或透射的总光强,最后用相关算法<sup>[1,3,9,26]</sup>得到目标物体的二维空间图像。假设光场调制图案为  $H_v$ ,记录的总光强为  $S_v$ ,则目标物体的二维图像可表示为

$$I = \sum_{v=1}^M S_v \cdot H_v, \quad (1)$$

式中,  $M$  为总调制次数。用 Hadamard 矩阵<sup>[27-29]</sup>作为照明图案并将其显示在 LED 阵列上,显示策略为文献[21]中的二次显示方式,采样过程可表示为

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ \vdots \\ O_n \end{bmatrix} = H \times O, \quad (2)$$

式中,  $S = [S_1, S_2, \dots, S_n]^T$  为强度测量值的列向量,  $O = [O_1, O_2, \dots, O_n]^T$  为 CGI 系统中物体的传递函数,行向量  $H(m) = [h_{m1}, h_{m2}, \dots, h_{mn}]$  为  $n$  阶 Hadamard 矩阵  $H$  的第  $m$  行。基于 Hadamard 矩阵的厄米特性质,用  $H$  除以  $\sqrt{n}$ ,可得到一个正交矩阵,且  $H^T = H^{-1}$ 。LED 阵列显示的 Hadamard 子图案由  $H^T$  的行向量整形得到,此时,矩阵的逆变换过程转化为统计平均过程。结合  $n$  个测量值和调制矩阵就能重建出单色数字图像,可表示为

$$O = \frac{1}{n} \times \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nm} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \times \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nm} \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix}. \quad (3)$$

### 2.2 篮织方式排列的彩色 LED 阵列

彩色数字图像由红(R)、绿(G)、蓝(B)三个通道组成,因此,用自主开发的彩色 LED 阵列作为 CGI 系统中的高速结构照明模块,具体结构如图 1(a)所示。可以发现,彩色 LED 照明模块由现场可编程门阵列(FPGA, Xilinx spartan6 XC6SLX100)、驱动电路和 64×64 的 LED 阵列(EVERLIGHT, SMD 18-038/RSGHBHC1-S02/2T)组成。图 1(b)为根据篮织方式排列的四个芯片,每个 LED 芯片由一个红色灯珠(峰值波长为 632 nm)、一个绿色灯珠(峰值波长为 518 nm)和一个蓝色灯珠(峰值波长为 468 nm)组成,且灯珠表面

没有用透镜进行光学封装。成像过程中,彩色 LED 阵列进行三次独立的单色照明,每次单色照明获得的光谱测量值分别用于计算数字彩色图像 R、G、B 通道的像素值。图 1(c)为常规笛卡儿排列方式的四个芯片。相比笛卡儿排列方式,篮织排列方式在保持红、蓝通道原始占空比的情况下具有不规则特性。当采样频率不超过图像最高频率的两倍时,适度的不规则采样可以提高图像质量,更好地恢复图像中的彩色高频信息。

用彩色 LED 阵列照明时,LED 阵列通过一个投影透镜成像到物体上,灯珠发出的光分别在物体对应的空间位置进行采样,因此,实验获得的分辨率

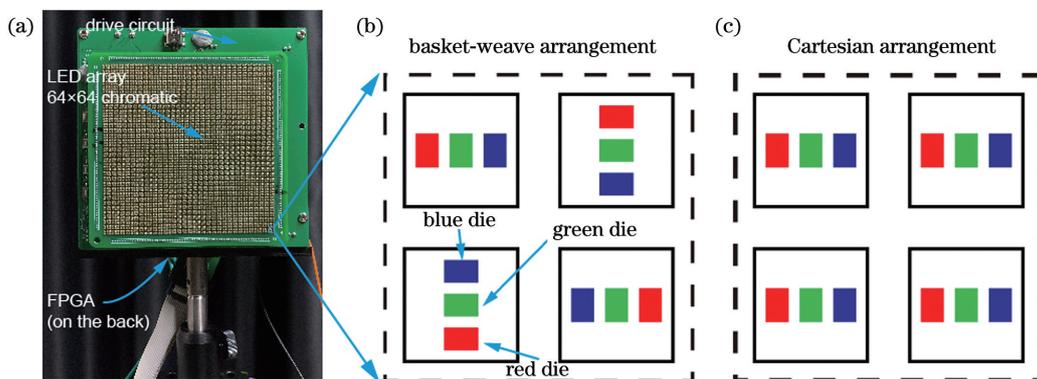


图 1 彩色 LED 照明模块的结构。(a)模块的实物图;(b)篮织排列;(c)笛卡儿排列

Fig. 1 Structure of the chromatic LED illumination module. (a) Physical picture of the module; (b) basket-weave arrangement; (c) Cartesian arrangement

为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  的彩色采样图像中每个像素内的 RGB 值都来自同一个 LED 芯片,这表明彩色采样图像不包含采样的空间位置信息,如在同一个 LED 芯片中相邻两个灯珠之间有  $0.3 \text{ mm}$  的间隙。因此,需要对彩色 LED 阵列进行建模并通过图像插值算法重建图像,以反映图像的空间信息,提高图像质量。

为了对 LED 阵列进行精确建模,将彩色 LED 阵列模型划分为栅格图。由于灯珠表面没有用透镜进行光学封装,因此不会影响 LED 阵列的建模。图 2(a)为四个 LED 芯片的物理结构和尺寸,排列方式为篮织方式。相邻 LED 芯片之间的间隙为

$0.375 \text{ mm}$ ,每个 LED 芯片的尺寸为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,每个灯珠的尺寸为  $0.3 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 。在相邻两个芯片的绿色灯珠中心之间画一条线,并将其分成  $N$  等份,以每个等份的长度作为划分 LED 阵列栅格图的栅格边长。计算结果表明,当  $N = 28$  时,LED 阵列的建模精度较高。建模后栅格图的分辨率为  $1792 \text{ pixel} \times 1792 \text{ pixel}$ ,且每个灯珠可以被精确划分成  $4 \times 6$  或  $6 \times 4$  的栅格。实验中对物体的采样过程等效于在仿真中将  $4 \times 6$  或  $6 \times 4$  栅格中的像素值求平均,从而得到分辨率为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  的采样图像。

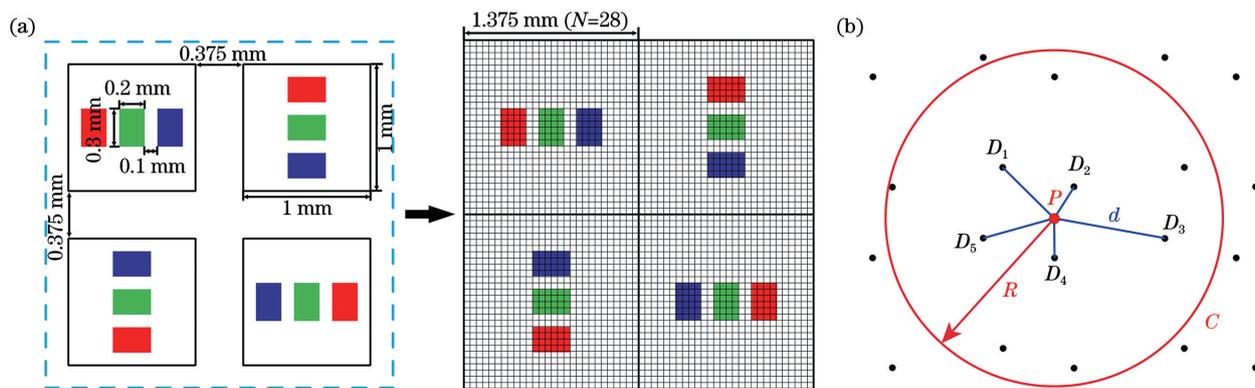


图 2 彩色 LED 阵列的模型。(a)  $N = 28$  时篮织排列的 LED;(b)改进的 Shepard 插值算法

Fig. 2 Model of the chromatic LED array. (a) LED arranged in basket-weave arrangement when  $N = 28$ ; (b) improved Shepard interpolation algorithm

双线性插值算法和双三次插值算法都只是简单地将所有通道的采样点位置视为 LED 芯片的几何中心,并没有考虑 R 通道和 B 通道中采样点的空间分布。因此,提出了一种新的采样图像插值算法。首先,对插值图像中每一个处于灯珠位置的栅格,用分辨率为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  采样图像中相应颜色通道和空间位置的像素值进行填充;且图像的 R、G、B 通道是单独进行插值的,如用采样图像中 R 通

道的像素值填充插值图像中 R 通道的栅格。然后,用改进的 Shepard 法对空白栅格进行插值处理。

为了展示插值过程,图 2(b)中省略了栅格,且只展示了 R 通道。将灯珠模型称为采样块,黑色圆点为采样块的几何中心, $C$  为以插值点  $P$  (未知)为中心、 $R$  为半径的圆形搜索区域。仅用  $C$  中距离  $P$  最近的 5 个采样点  $D_i$ 。计算  $P$  的值,加权因子  $s_i$  可表示为

$$s_o(d_o) = \begin{cases} \frac{1}{d_o}, & 0 < d_o \leq \frac{R}{3} \\ \frac{27}{4R} \left(\frac{d_o}{R} - 1\right)^2, & \frac{R}{3} < d_o \leq R \\ 0, & d_o > R \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $d_o$  为  $D_o$  与  $P$  之间的距离。实际操作中,  $R = 2N$ 。插值函数可表示为

$$f(P) = \begin{cases} \left[ \sum_{o=1}^5 (s_o)^2 z_o \right] / \left[ \sum_{o=1}^5 (s_o)^2 \right], & d_o \neq 0 \\ z_o, & d_o = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $z_o$  为  $D_o$  的已知像素值,  $f(P)$  为  $P$  点的像素值。综上所述, 设计的图像重建算法能反映采样点的空间位置信息, 相比双线性插值算法和双三次插值算法, 重建图像的精确度更高, 尤其是对具有复杂纹理的彩色图像。原因是图像中 R 通道红色色块位置与绿色色块位置的像素值相差较大, B 通道中蓝色色块位置与绿色色块位置的像素值相差也较大。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 彩色计算鬼成像系统

彩色 CGI 实验系统如图 3 所示, 包括自主设计的彩色 LED 阵列、单反相机镜头(适马 Sigma, 焦距  $f = 30$  mm, 光圈数  $F$  为 1.4)、聚光透镜(北京世纪 BOCIC, OCL3-050-050,  $f = 50$  mm,  $F$  为 1.0)、单像素探测器(Thorlabs PDA100A-EC)、计算机、高动态范围数字采集器(PicoScope 6404D)。该系统通过 FPGA 控制器的输入/输出(I/O)口输出控制信号, 使 LED 阵列显示调制图案, 光束经相机透镜会聚到物体上, 再由透镜会聚到单像素光电探测器接收面上。

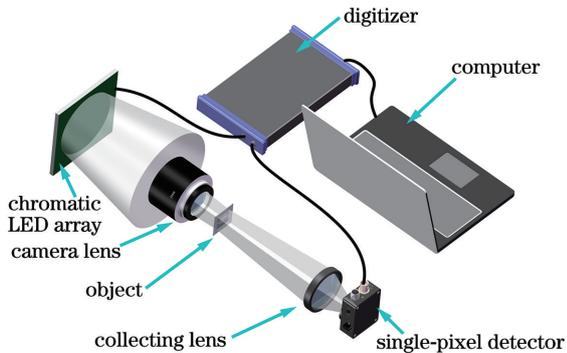


图 3 基于彩色 LED 阵列的 CGI 系统

Fig. 3 CGI system based on chromatic LED array

#### 3.2 仿真分析

仿真时选取具有高频信息的高分辨率彩色图像

作为原始图像, 其分辨率为  $3840 \text{ pixel} \times 3840 \text{ pixel}$ 。首先, 将原始高分辨率图像  $I_o(i, j)$  用双三次插值算法缩放到分辨率为  $1792 \text{ pixel} \times 1792 \text{ pixel}$  的图像, 以模拟现实中将无限分辨率的物体图像分割成  $N = 28$  的栅格图过程。然后, 对分辨率为  $1792 \text{ pixel} \times 1792 \text{ pixel}$  的图像进行采样, 用 2.2 小节中的方法得到分辨率为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  的采样图像。最后, 用设计的算法对采样图像进行插值处理, 获得分辨率为  $3840 \text{ pixel} \times 3840 \text{ pixel}$  ( $N = 60$ ) 的插值图像  $I_r(i, j)$ 。用 RMSE 作为各通道图像质量的评价指标, 可表示为

$$X_{\text{RMSE}}^l = \sqrt{\frac{1}{p \times q} \sum_{i,j} [I_r(i, j) - I_o(i, j)]^2}, \quad (6)$$

式中,  $p \times q$  为图像的尺寸,  $l$  为图像 RGB 通道中的一个通道。用三个通道 RMSE 的平均值  $X_{\text{RMSE}}^{\text{RGB}}$  评价彩色图像的质量, 可表示为

$$X_{\text{RMSE}}^{\text{RGB}} = (X_{\text{RMSE}}^{\text{R}} + X_{\text{RMSE}}^{\text{G}} + X_{\text{RMSE}}^{\text{B}}) / 3. \quad (7)$$

用本算法对 35 幅原始高分辨率图像进行采样和重建, 同时与笛卡儿采样得到的结果进行对比。图 4 为两种采样方式重建图像的 RMSE, 计算结果表明, 笛卡儿排列方式重建图像的平均 RMSE 为 22.87%, 篮织排列方式重建图像的平均 RMSE 为 21.82%。可以发现, 相比笛卡儿排列, 篮织排列方式得到的图像平均 RMSE 下降了约 4.6%, 原因是篮织采样对彩色高频信息的存储性能优于笛卡儿采样。图 5 为两种方法重建的图像及其 RMSE, 可以发现, 相比笛卡儿排列, 篮织方式的视觉效果更好。

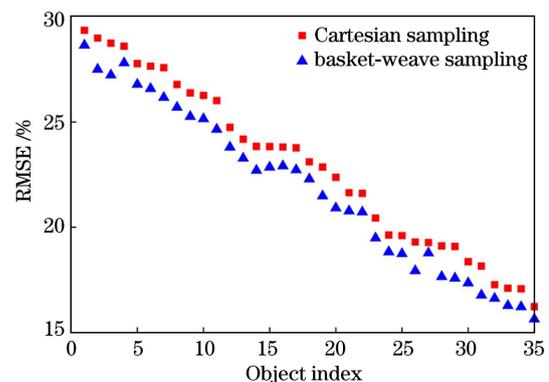


图 4 不同采样方式重建图像的 RMSE

Fig. 4 RMSE of reconstructed image with different sampling methods

选取 35 幅具有复杂细节的高分辨率彩色图像进行采样, 并分别用马赛克插值算法、双三次插值算

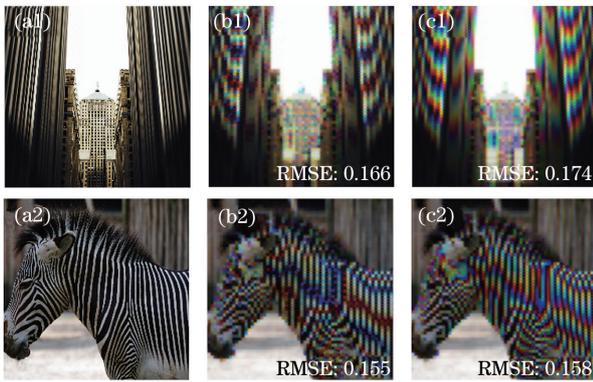


图 5 不同采样方式重建的图像。(a)原始图像;(b)篮织采样;(c)笛卡儿采样

Fig. 5 Images reconstructed with different sampling ways. (a) Original image; (b) basket-weave sampling; (c) Cartesian sampling

法、双线性插值算法和本算法重建图像,重建图像的 RMSE 如图 6 所示。其中,马赛克插值算法重建图像的平均 RMSE 为 23.81%,双三次插值算法的平均 RMSE 为 22.48%,双线性插值算法的平均

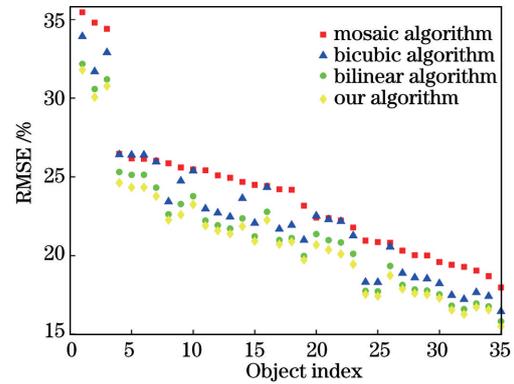


图 6 不同算法重建图像的 RMSE

Fig. 6 RMSE of reconstructed image with different algorithms

RMSE 为 21.46%,本算法的平均 RMSE 为 21.04%。可以发现,相比双线性插值算法和双三次插值算法,本算法的平均 RMSE 分别降低了 2.0% 和 6.4%,原因是本算法通过反映空间信息提高了重建彩色图像的质量。图 7 为不同采样方式下不同算法重建的部分图像及其 RMSE。

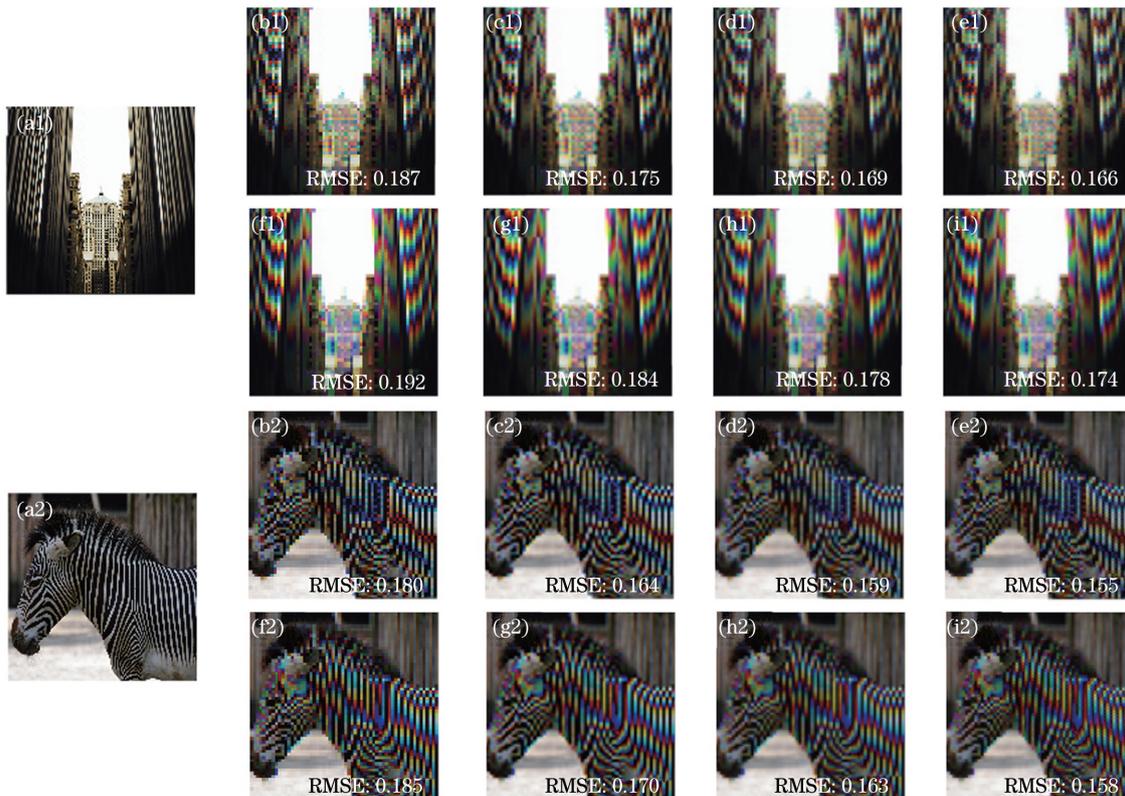


图 7 不同算法重建的图像。(a)原始图像;(b)~(e)篮织采样下的马赛克插值算法、双三次插值算法、双线性插值算法、本算法;(f)~(i)笛卡儿采样下的马赛克插值算法、双三次插值算法、双线性插值算法、本算法

Fig. 7 Images reconstructed by different algorithms. (a) Original image; (b)~(e) mosaic interpolation algorithm, bicubic interpolation algorithm, bilinear interpolation algorithm, our algorithm in basket-weave sampling; (f)~(i) mosaic interpolation algorithm, bicubic interpolation algorithm, bilinear interpolation algorithm, our algorithm in Cartesian sampling

### 3.3 实验分析

实验中的 CGI 系统用篮织排列的彩色 LED 阵列作为结构照明模块,将原始高分辨率图像的分辨率缩放至  $1792 \text{ pixel} \times 1792 \text{ pixel}$ ,在透明胶片上用彩色激光打印该图像,并将其作为实验系统中的物体。彩色打印机的分辨率为  $2400 \text{ dpi}$ (dots per inch),物体为透射式,实际尺寸为  $1.9 \text{ cm} \times 1.9 \text{ cm}$ 。考虑到探测器的光谱响应会影响不同光谱下的探测光强,采样时将一张白纸作为物体,通过彩色 LED 阵列进行三次独立单色照明,再调整 R、G、B 三通道的

权重,保证最终合成的彩色图像为白色,以实现颜色标定和配准。将确定的 R、G、B 通道权重用于后续对物体的成像,以消除探测器光谱响应对实验结果的影响。用四种不同的插值算法对分辨率为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  的采样图像进行插值和计算,得到原始高分辨率图像与插值图像的 RMSE。同时,设计了一个根据笛卡儿方式排列的彩色 LED 阵列进行对比,两种方法重构的图像如图 8 所示。可以发现,篮织采样得到的图像 RMSE 比笛卡儿采样低,且本算法插值得到的图像 RMSE 最小,实验结果与仿真结果吻合。

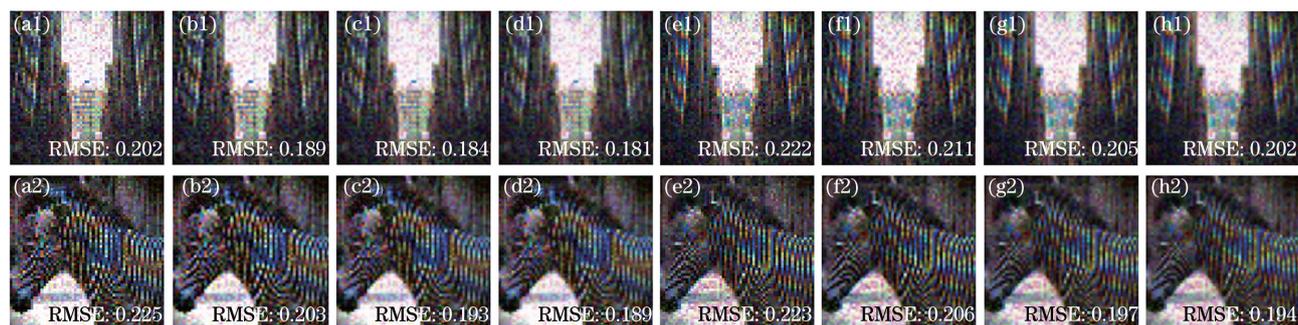


图 8 不同算法对真实图像的重建结果。(a)原始图像;(b)~(e)篮织采样下的马赛克插值算法、双三次插值算法、双线性插值算法、本算法;(f)~(i)笛卡儿采样下的马赛克插值算法、双三次插值算法、双线性插值算法、本算法

Fig. 8 Real image reconstruction results of different algorithms. (a) Original image; (b)–(e) mosaic interpolation algorithm, bicubic interpolation algorithm, bilinear interpolation algorithm, our algorithm in basket-weave sampling; (f)–(i) mosaic interpolation algorithm, bicubic interpolation algorithm, bilinear interpolation algorithm, our algorithm in Cartesian sampling

为了得到一个彩色的采样图像,实验中对三个颜色通道进行了线性归一化。但噪声会导致光强探测信号的最小值和最大值超出真值范围,使归一化后的图像存在不正确的颜色匹配和像素值。为了解决该问题,在原始高分辨率图像中绘制了两个分辨率为  $300 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$  的块进行标定,同一个块内所有的像素值相同,且两个块内的像素值分别为 200 和 50。原因是归一化后图像中有些像素值小于 0 或大于 255,经过成像实验后标定块在采样图像的相应位置是两个分辨率为  $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$  的块,在线性归一化的过程中,将该图像块的像素值进行求和再平均,使其值分别为 200 和 50。

## 4 结 论

自主研发了一种根据篮织方式排列的彩色 LED 阵列,并对 LED 阵列进行了建模,提出了一种图像插值算法。基于 CGI 系统进行了数值仿真和实验。结果表明,对于细节复杂的彩色图像,篮织采样比传统笛卡儿采样方式重建图像的 RMSE 低,原因是篮织采样能更好地保存彩色图像的高频信息。

相比其他插值算法,本算法重建图像的 RMSE 更低。此外,研发的彩色 LED 阵列可应用于使用结构照明的其他成像系统中,为提升 CGI 图像的质量提供了一个新方案,但本算法对于图像质量的提升有限,因此,还需从其他角度寻找提升图像质量的新方案。

## 参 考 文 献

- [1] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [2] Wu Z W, Qiu X D, Chen L X, et al. Current status and prospect for correlated imaging technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 060001.  
吴自文, 邱晓东, 陈理想, 等. 关联成像技术研究现状及展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(6): 060001.
- [3] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope [J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285-289.
- [4] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial

- spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605-609.
- [5] Zhang A X, He Y H, Wu L G, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 374-377.
- [6] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [7] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [8] Sun M J, Zhang J M. Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction: a brief review[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 732.
- [9] 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.
- [10] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [11] Candès E, Romberg J. Sparsity and incoherence in compressive sampling[J]. *Inverse Problems*, 2007, 23(3): 969-985.
- [12] Baraniuk R G. Compressive sensing [lecture notes] [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(4): 118-121.
- [13] Feng W, Zhao X D, Tang S J, et al. Compressive computational ghost imaging method based on region segmentation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101105.  
冯维, 赵晓冬, 汤少靖, 等. 基于区域分割的压缩计算鬼成像方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101105.
- [14] Wang Y Y, Ren Y C, Chen L Y, et al. Terahertz wave wide-beam imaging technology based on block compressive sensing theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0407001.  
王与焯, 任宇琛, 陈霖宇, 等. 基于分块压缩感知理论的太赫兹波宽光束成像技术[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0407001.
- [15] Ryzkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Ghost imaging in the time domain[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 167-170.
- [16] Faccio D. Temporal ghost imaging [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 150-152.
- [17] Devaux F, Moreau P A, Denis S, et al. Computational temporal ghost imaging [J]. *Optica*, 2016, 3(7): 698-701.
- [18] Jiang W J, Li X Y, Jiang S, et al. Increase the frame rate of a camera via temporal ghost imaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 122: 164-169.
- [19] Sun M J, Chen W, Liu T F, et al. Image retrieval in spatial and temporal domains with a quadrant detector [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1-6.
- [20] Sun M J, Wang H Y, Huang J Y, et al. Improving the performance of computational ghost imaging by using a quadrant detector and digital micro-scanning [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 4105.
- [21] Howland G A, Lum D J, Ware M R, et al. Photon counting compressive depth mapping [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23822-23837.
- [22] Sun M J, Edgar M P, Phillips D B, et al. Improving the signal-to-noise ratio of single-pixel imaging using digital microscanning[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10476-10485.
- [23] Lochocki B, Gambin A, Manzanera S, et al. Single pixel camera ophthalmoscope [J]. *Optica*, 2016, 3(10): 1056-1059.
- [24] Xu Z H, Chen W, Penuelas J, et al. 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2427-2434.
- [25] French A S, Snyder A W, Stavenga D G, et al. Image degradation by an irregular retinal mosaic[J]. *Biological Cybernetics*, 1977, 27(4): 229-233.
- [26] Sun M J, Meng L T, Edgar M P, et al. A Russian Dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3464.
- [27] Pratt W K, Kane J, Andrews H C, et al. Hadamard transform image coding [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1969, 57(1): 58-68.
- [28] Zhang Z, Ma X, Zhong J, et al. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [29] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, et al. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619-19639.