

文章编号 1004-924X(2012)11-2523-08

## 应用压缩传感理论的单像素相机成像系统

陈 涛<sup>1\*</sup>, 李正炜<sup>1,2</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 王 斌<sup>1</sup>, 郭 爽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**采用稀疏二进制矩阵作为测量矩阵完成了单像素相机对不同场景的拍摄。基于压缩传感理论设计的单像素相机, 利用数字微镜阵列和单个探测元件实现高分辨率图像的拍摄, 将图像采集和压缩合二为一, 减少了数据, 降低了系统规模、复杂度和成本。对测量矩阵进行了分析, 给出了二进制测量矩阵精确重构条件。搭建了硬件实验平台, 采用稀疏二进制测量矩阵, 对笔划复杂度不同的“中”字、“国”字和复杂实物这 3 种不同的场景进行了拍摄实验, 利用梯度投影重构算法重构出目标图像, 图像分辨率为数字微镜阵列大小。实验结果显示, 对于 3 种不同场景, 在测量次数为目标图像像素总数的 20%~30% 时, 能精确重构出目标图像, 表明单像素相机能实现高分辨率图像的拍摄。

**关键词:**单像素相机; 压缩传感; 梯度投影; 稀疏二进制矩阵

**中图分类号:** TP391; TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2523

## Imaging system of single pixel camera based on compressed sensing

CHEN Tao<sup>1\*</sup>, LI Zheng-wei<sup>1,2</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, GUO Shuang<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: chent@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** A single pixel camera was used to shoot different scenes by taking a sparse binary matrix as the measurement matrix. The single pixel camera based on compressed sensing theory could acquire a high resolution image by using a Digital Micromirror Device (DMD) and a single detector. It captured and compressed the picture simultaneously, so that the data amount, scale, complexity and the cost of the system were reduced greatly. In this paper, the effect of measurement matrix upon the precise of reconstructed picture was analyzed, and the condition to reconstruct the binary matrix for object picture precisely was given. An experimental platform was established and imaging experiments under three different scenes were performed for different strokes of the words “China” and complex real objects using sparse binary measurement matrix. The picture with the picture resolution of as large as the size of the DMD was reconstructed by gradient projection algorithm. Experiment results indicate

收稿日期: 2012-06-07; 修订日期: 2012-06-25.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AA8082035)

that single pixel camera could reconstruct the image precisely when the number of measurements are 20%~30% of the total number of pixels for the object image. It concludes that the single pixel camera can acquire high resolution images.

**Key words:** single pixel camera, compressed sensing, gradient projection, sparse binary matrix

## 1 引言

传统的图像传输过程中,采集的数据经过压缩之后,只保留一部分有效信息,这无疑造成采集、存储资源和成本上的浪费。为了解决上述问题,将压缩传感理论<sup>[1-3]</sup>应用于成像<sup>[4-6]</sup>。2006年由美国 RICE 大学的研究人员设计了单像素相机<sup>[7]</sup>,利用数字微镜阵列(DMD)实现对光学图像的线性采样,通过单个探测器元件测量采样值,之后利用重构算法重构出目标图像。单像素相机将图像采集和压缩合二为一,降低了系统规模、成本、复杂度,节省了存储资源,同时能适用于传统方法无法拍摄的非可见光领域。2008年 Wai Lam Chan 等人提出了单像素太赫兹相机<sup>[8]</sup>,克服了传统太赫兹成像的不足,不需要对成像目标或太赫兹光束进行光栅扫描,而且有较高的探测灵敏度,能实现高速图像采集。2009年,清华大学马坚伟教授提出将单像素相机应用于航天遥感,通过计算机模拟,在测量率(测量次数与像数总数的比值)为 25% 时能精确恢复出图像<sup>[9-10]</sup>。西北工业大学研究人员符文星等人对单像素相机应用于导弹制导也进行了研究<sup>[11]</sup>,如果能实现图像的快速获取和识别,这种方案是可行的。2011年, Filipe Magalhães 等人对主动照明单像素相机进行了研究<sup>[12]</sup>。

单像素相机成像系统可分为 3 个模块,光路调制模块、数据采集模块、图像重构模块。光路调制模块根据测量矩阵设置 DMD 翻转状态,在像面上对光学图像进行线性采样。数据采集模块采用光电倍增管测量收集的总光能量,并进行 A/D 转换及存储。图像重构模块,由测量矩阵采集测量值,利用重构算法重构出目标图像。

单像素相机的测量矩阵为二进制矩阵,本文对二进制测量矩阵进行了分析,给出了精确重构出目标图像的条件。搭建了硬件实验平台,利用

稀疏二进制测量矩阵,实现了对笔划复杂度不同的“中”字、“国”字和复杂实物这 3 种不同场景进行拍摄实验,利用梯度投影重构算法重构出了目标图像。

## 2 压缩传感理论

压缩传感,是一种利用稀疏的或可压缩的信号进行信号重建的技术。对于信号  $x \in \mathbf{R}_{N \times 1}$ ,存在测量矩阵  $\Phi \in \mathbf{R}_{M \times N}$ , ( $M \ll N$ ) 在该矩阵下的线性测量值  $y \in \mathbf{R}_{M \times 1}$ ,它们之间的关系:

$$y = \Phi x, \quad (1)$$

式(1)可以看作是原信号  $x$  在  $\Phi$  下的线性投影。因为  $y$  的维数远低于  $x$  的维数,所以式(1)有无穷多个解,很难重构原始信号。然而,如果原始信号  $x$  是  $K$ -稀疏的,并且  $\Phi$  满足约束等距性条件,即对于任意  $K$ -稀疏信号和常数  $\delta_k \in (0, 1)$ :

$$(1 - \delta_k) \|x\|_2 \leq \|\Phi x\|_2 \leq (1 + \delta_k) \|x\|_2, \quad (2)$$

理论证明,信号  $x$  可以由测量值  $y$  通过求解最优  $l_0$  范数问题精确重构。

$$x = \operatorname{argmin} \|x\|_0 \quad s.t. \quad y = \Phi x, \quad (3)$$

式(3)中  $\|\cdot\|_0$  为向量  $l_0$  范数,表示向量  $x$  中非零元素的个数,测量次数  $M$  必须满足  $M = O(K \log(N))$ 。式(3)为非凸优化问题,是典型的 NP-hard 问题,计算复杂度非常高。因此 Candes 和 Donoho 提出用  $l_1$  范数来代替  $l_0$  范数

$$x = \operatorname{argmin} \|x\|_1 \quad s.t. \quad y = \Phi x, \quad (4)$$

从而把(3)转化为一个凸优化问题来求解,此时原始图像仍可精确重建,在图像可稀疏表示的前提下,式(3)和式(4)的解是等价的。

通常对于所拍摄的场景都是比较复杂的,所以需要图像进行稀疏变换,如小波变换、离散余弦变换等,变换表达式:

$$x = \Psi \alpha, \quad (5)$$

将式(5)代入式(1):

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \alpha = A \alpha \quad A = \Phi \Psi, \quad (6)$$

将式(6)代入式(4):

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmin} \|\alpha\|_1 \quad s.t. \quad y = A\alpha. \quad (7)$$

只要测量矩阵  $A$  能满足约束等距性式(2), 测量次数  $M$  满足  $M = O(K \log(N))$ , 即可精确估计出  $\alpha$ , 对  $\alpha$  进行反稀疏变换就可得到目标图像。

### 3 单像素相机成像系统

图 1 所示为单像素相机结构模型。DMD 是单像素相机的关键元件, 它能快速向  $\pm 12^\circ$  方向翻转(如图 2 所示), 进行光路调制; 将 DMD 芯片放置在透镜 1 所成像面上, 对每个像素进行光路调制, 将需要获取像素的光能量往透镜 2 方向反射, 由透镜 2 收集反射过来的光能量; 再由光电倍增管测得所选像素的总能量实现对整幅图像的采样测量, DMD 阵列大小即为目标图像的分辨率。

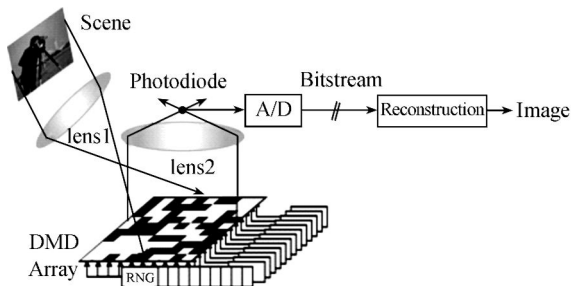


图 1 单像素相机结构模型图<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Block diagram<sup>[7]</sup> of single pixel camera

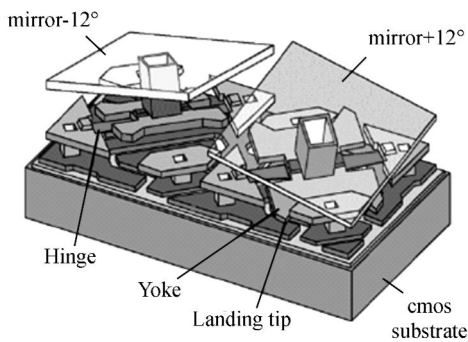


图 2 DMD 微镜结构

Fig. 2 Structure of DMD micromirror

单像素相机成像系统可分为 3 个模块, 光路调制模块、数据采集模块、图像重构模块, 如图 3 所示。



图 3 单像素相机模块框图

Fig. 3 Module diagram of single pixel camera

#### 3.1 光路调制模块

光路调制模块, 是根据已知的二进制测量矩阵设置 DMD 微镜的翻转状态(1 表示微镜往  $+12^\circ$  方向翻转, 0 表示微镜往  $-12^\circ$  方向翻转)改变对应像素点的光路, 使需要采集的光能量往透镜 2 方向反射, 实现对光学图像的线性采样。采样测量矩阵  $\Phi = (\Phi_1 \Phi_2 \cdots \Phi_M)^T$ ,  $\Phi$  为 0、1 二进制矩阵,  $\Phi_i$  与 DMD 中镜片状态对应, DMD 全帧翻转  $M$  次即可得到测量值向量  $y$ 。

二进制测量矩阵是否能很好地满足式(2), 对重构图像的精度有直接的影响, 所以对它的选取是单像素相机中重要的部分。

假设  $x$  是变量值为 1, 稀疏度为  $k$  的信号,  $r$  为  $\Phi_i$  中 1 的个数, 则式(2)可写为:

$$(1 - \delta_k) k \leq M \left[ \frac{r}{N} k \right]^2 \leq (1 + \delta_k) k, \quad (8)$$

$\delta_k \in (0, 1)$ , 所以当  $r$  满足下式时, 能比较好地满足约束等距性, 获得好的重构精度:

$$\sqrt{(1 - \delta_k) \frac{N^2}{Mk}} \leq r \leq \sqrt{(1 + \delta_k) \frac{N^2}{Mk}}, \quad (9)$$

$\delta_k \in (0, 1)$ , 所以当二进制测量矩阵中每行 1 个数  $r$  满足式(9)时, 单像素相机能精确重构出目标图像。对单像素相机而言, 输入信号为图像信号, 通常是非稀疏性的, 所以  $r$  的取值比较小, 即二进制测量矩阵为稀疏矩阵。

本文采用稀疏二进制矩阵作为测量矩阵, 有如下两种:

(1) 稀疏二进制随机矩阵(SBRD)

$$\Phi_{M \times N} = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \cdots \varphi_N] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

构造方法: 首先生成  $M \times N$  维的 0 矩阵, 对每列随机选取  $d$  个元素为 1。

(2) 二进制分块对角矩阵(BPBD)

$$\Phi_{M \times N} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 \cdots & 0 \cdots & 0 \cdots \\ 0 \cdots & \Phi_2 & 0 \cdots & 0 \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 \cdots & 0 \cdots & 0 \cdots & \Phi_M \end{bmatrix} \Phi_i = \mathbf{1}_L, \quad (11)$$

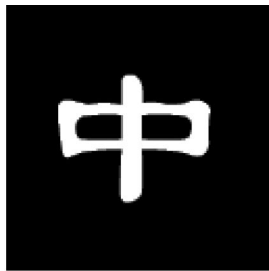
构造方法<sup>[13]</sup>如上所示,其中  $L=N/M$ ;

以二值图像“中”为例,如图 4(a)所示分辨率为  $128 \times 128$ ,稀疏度(非 0 个数) $k=1\ 697$ ,像素总数  $N=16\ 384$ ,取  $M=3\ 277$ ,代入式(9)得  $\delta_k \in (0, 1)$ :

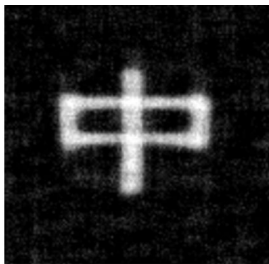
$$6.95\sqrt{(1-\delta_k)} \leq r \leq 6.95\sqrt{(1+\delta_k)}, \quad (12)$$

$r$  的最大值不应超过 10。

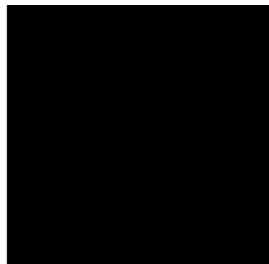
选取  $r$  值满足和满足式(12)的两种二进制矩阵  $\mathbf{A}_1$ 、 $\mathbf{A}_2$  作为测量矩阵,通过所编写的程序模拟单像素相机拍摄过程,利用梯度投影算法进行重构。其中  $\mathbf{A}_1$  为取  $d=2$  的稀疏二进制随机矩阵(SBRD),维数为  $3\ 277 \times 16\ 384$ ,  $r \approx (2 \times 16\ 384 / 3\ 277) = 9.999$  能满足式(12);  $\mathbf{A}_2$  是二进制矩阵伯努利矩阵,维数  $3\ 277 \times 16\ 384$ ,  $r=(16\ 384/2)=8\ 192$ ,不能满足式(12)。两种测量矩阵重构结果如图 4 所示,  $\mathbf{A}_1$  能重构出目标图像,而  $\mathbf{A}_2$  无法重构出目标图像。



(a)原始图片  
(a)Origin image



(b)SBRD矩阵重构结果  
(b)Reconstructed result by SBRD matrix



(c)二进制伯努利矩阵重构结果  
(c)Reconstructed result by binary Bernoulli matrix

图 4 SBRD 与二进制伯努利矩阵模拟重构结果  
Fig. 4 Reconstruct by SBRD and Bernoulli matrix

### 3.2 数据采集

数据采集模块,利用光电倍增管测量每次由透镜 2 收集的线性采样总的光能量值,DMD 每次翻转完成后发送同步脉冲,触发 NI 数据采集卡进行采样,同时存储测量数据,图 5 为采集流程图。

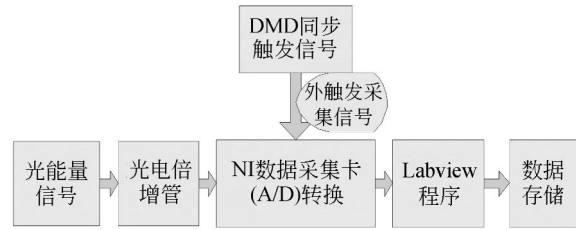


图 5 数据采集框图

Fig. 5 Block diagram of data acquisition

光电倍增管输出的是模拟电压值,需要对其进行 A/D 转换。所用的 DMD 空间光路调制器,实时 USB 下载翻转速度每秒最快能到 150 多次。在现有实验设备条件下为确保采集数据准确完整,将翻转速度最快设置为 130 次/秒。同时为了降低测量时的误差,对每次翻转状态测量 100 次求平均。如此,每秒钟需要存储大量的数据,如果丢失一帧数据则无法精确重构出目标图像。因此,快速有效的存储程序是很重要的,图 6 所示为用 Labview 编写的采集存储程序,使用此存储程序能快速有效地存储采集数据。

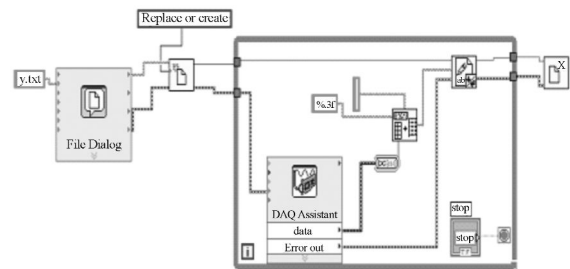


图 6 采集存储程序

Fig. 6 Program of acquisition and storage

### 3.3 图像重构

图像重构算法是单像素相机的关键部分,根据线性采样所用的测量矩阵和所得测量值向量,利用梯度投影算法重构出目标图像。图像恢复的效果,关系到单像素相机成像系统整体的性能。

本文采用凸松弛法中的梯度投影算法<sup>[14]</sup>,该算法以重构速度快、精度高而著称。主要思想是

从可行点出发,沿着下降的可行方向进行搜索,求出使目标函数下降的新的可行点。

式(7)为约束最优化问题,可将其转为无约束凸最优化问题:

$$\min_x \frac{1}{2} \| \mathbf{y} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} \|_2^2 + \tau \| \boldsymbol{\alpha} \|_1, \quad (13)$$

$\tau$  为非零参数。

式(13)又可转换为标准有界约束二次规划问题:

$$\min_z \frac{1}{2} \mathbf{z}^T \mathbf{B} \mathbf{z} + \mathbf{c}^T \mathbf{z} \equiv F(\mathbf{z}), \quad (14)$$

$$s. t. \quad z \geq 0$$

其中:  $\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mu \\ v \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{b} = \mathbf{A}^T \mathbf{y}$ ,  $\mathbf{c} = \tau l_{2n} + \begin{bmatrix} -b \\ b \end{bmatrix}$ ,

$$\mu = (|\alpha| + \alpha)/2, v = (|\alpha| - \alpha)/2,$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & -\mathbf{A}^T \mathbf{A} \\ -\mathbf{A}^T \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{A} \end{bmatrix}.$$

求解式(13)问题转化为求解式(14)问题。式(14)可用梯度投影算法进行求解,算法具体步骤如下:

步骤 0: 输入:  $\mathbf{y}, \mathbf{A}, z^{(0)}$ , 终止条件参数  $tolp$ , 参数  $\beta_{min}, \beta_{max}, \beta^{(0)} \in [\beta_{min}, \beta_{max}]$ ,  $k=0$ ;

步骤 1: 计算  $\delta^{(k)}$ ,  $\delta^{(k)} = (z^{(k)} - \beta^{(k)} \nabla F(z^{(k)}))_+ - z^{(k)}$

步骤 2: 计算

$$\lambda^{(k)} = \text{mid} \left\{ 0, \frac{(\delta^{(k)})^T \nabla F(z^{(k)})}{(\delta^{(k)})^T \mathbf{B} (z^{(k)})}, 1 \right\}$$

$$z^{(k+1)} = z^{(k)} + \lambda^{(k)} \delta^{(k)}$$

步骤 3: 更新  $\beta$ ,  $\gamma^{(k)} = (\delta^{(k)})^T \mathbf{B} \delta^{(k)}$

如果  $\gamma^{(k)} = 0$ , 则  $\beta^{(k+1)} = \beta_{max}$ , 否则

$$\beta^{(k+1)} = \text{mid} \left\{ \beta_{min}, \frac{\| \delta^{(k)} \|_2^2}{\gamma^{(k)}}, \beta_{max} \right\}$$

步骤 4: 判断是否满足终止条件, 否则终止循环迭代, 不是则返回步骤 1。

循环迭代终止条件有几种可依据具体情况选择其中一种作为终止条件:

迭代终止条件 1:

$$abs(F - pre\_F) / pre\_F < tol p. \quad (15)$$

迭代终止条件 2:

$$\| z - (z - \alpha \nabla F(z))_+ \| \leq tol p. \quad (16)$$

迭代终止条件 3:

$$\frac{\| dz \|}{\| z \|} < tol p. \quad (17)$$

采用的编程工具为 Visual Studio 2008。

## 4 实验结果与分析

图 7 所示为单像素相机光路图,图 8 所示为单像素相机实验平台布局。

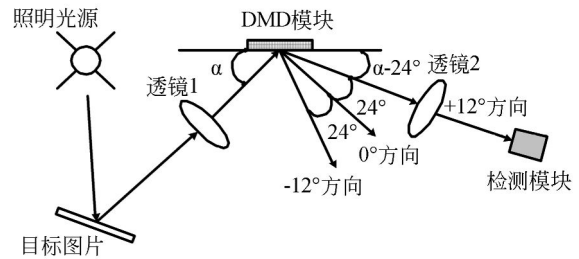


图 7 单像素相机光路图

Fig. 7 Optical path of single pixel camera

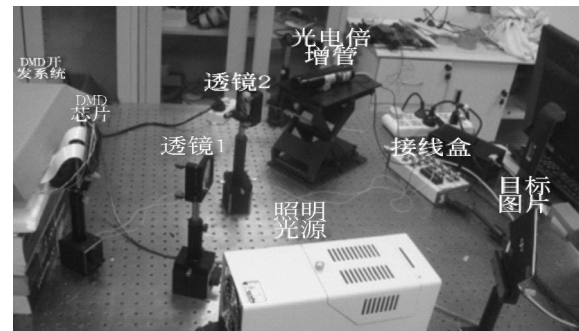


图 8 实验平台布局

Fig. 8 Experimental layout

### 4.1 实验设备

所用的 DMD 空间光路调制器为上海辛同公司开发的 XD-D01 系统,阵列大小为  $768 \times 1024$ ; 微镜尺寸大小为  $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$ , 适应波段  $350 \sim 2700 \text{ nm}$ ; 微镜二进制翻转频率为全屏 150 Hz, 实时 USB 下载。光电倍增管带宽为  $0 \sim 20 \text{ MHz}$ , 响应时间为 15 ns。NI 数据采集卡为 ni-6115, 计算机为 CPU Pentium (R) Dual-Core CPU E5800, 3.2 GHz, 内存 2 G。

### 4.2 实验结果

由于受电脑内存限制,不能处理分辨率为  $256 \times 256$  的图片,所以实验处理图像的分辨率为  $128 \times 128$ 。

实验完成了 3 组实验,对笔画简单的“中”字和笔画稍复杂的“国”字和对实际较复杂的实物的拍摄。测量率(Measurement Rate MR)=测量次

数/像素总数 $\times 100\%$ ,恢复的目标图片分辨率为 $128\times 128$ 。

4.2.1 “中”字拍摄

实验采用的测量矩阵为稀疏二进制随机测量矩阵。实际实验拍摄重构结果如图 9 所示。

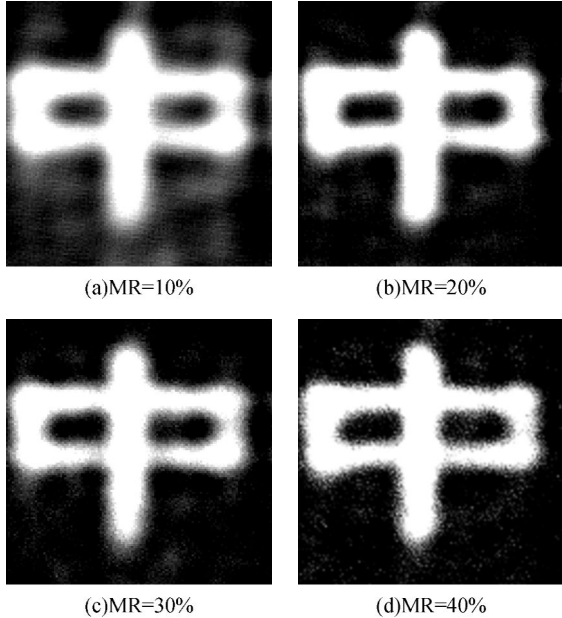


图 9 “中”字拍摄实验重构结果  
Fig. 9 Reconstructed results of “中”

4.2.2 “国”字拍摄

实验采用的测量矩阵为稀疏二进制随机矩阵,重构结果如图 10 所示。

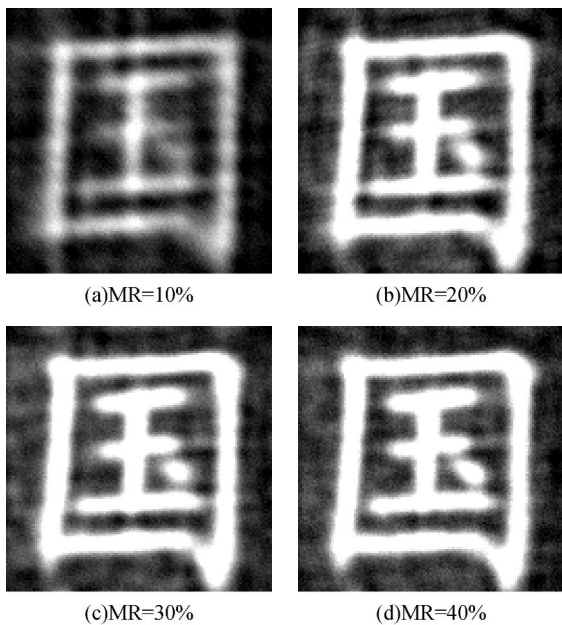


图 10 “国”字拍摄重构结果  
Fig. 10 Reconstructed results of “国”

4.2.3 复杂实物的拍摄

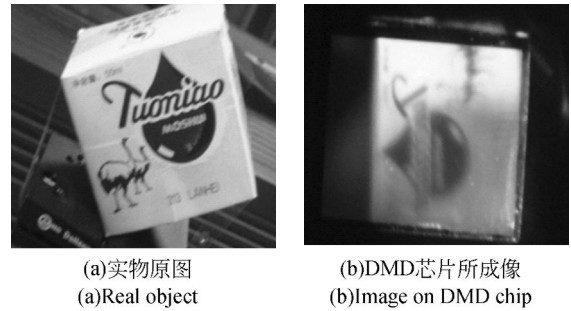


图 11 复杂实物原图

Fig. 11 Images of complex real object

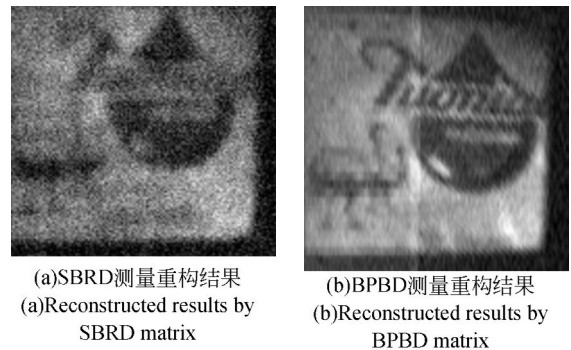


图 12 复杂实物拍摄重构结果

Fig. 12 Reconstruct results of complex real object

实验结果表明,利用单像素相机拍摄对比度比较高、结构简单的场景时 20%测量率就能比较精确地重构出目标图片,如图 9 对“中”字和图 10 对“国”字拍摄重构结果。拍摄场景复杂时测量率为 30%时就能比较精确地重构出目标图像,如图 12 所示。拍摄测量和重构时间如表 1 所示。

表 1 拍摄测量和重构时间

Tab. 1 Measuring and reconstructed time

	MR	测量时间	重构时间
		/s	/min
“中”	10%	13	0.75
“中”	20%	26	1.35
“中”	30%	38	5.56
“中”	40%	51	8.34
“国”	10%	13	0.63
“国”	20%	26	1.03
“国”	30%	38	2.65
“国”	40%	51	6.65
“复杂实物”SBRD	30%	38	3.11
“复杂实物”BPBD	30%	38	0.875

## 5 结 论

本文对 3 种不同场景进行拍摄,并精确重构出目标图像,提出了所用二进制测量矩阵能精确重构出目标图像需要满足的条件。实验说明,在二进制测量矩阵满足所提出条件情况下,测量次数是像素总数的 20%~30% 时能精确重构出目标图像。与传统 CCD 和 CMOS 成像仪相比,它无需面阵传感器,只需要单个探测元件,从而大大

降低了成像系统的成本、规模、复杂度。单像素相机的拍摄测量过程也是对图像的压缩过程,得到的测量数据无需再进行压缩处理,存储的数据量减少了很多,节约了数据存储空间,有利于远距离传输。采用的梯度投影重构算法,具有抗干扰性,在有噪声情况下也能精确重构出目标图像。目前,拍摄测量需要花几十秒时间,图像重构需要花几分钟时间,没能实现实时快速的拍摄,这也是后续工作需要解决的问题。

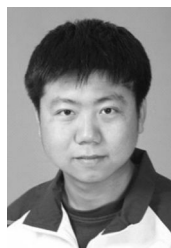
### 参考文献:

- [1] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] CANDÉS E, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [3] CANDÉS E. Compressive sampling[C]. *Proceedings of International Congress of Mathematicians*, 2006: 1433-1452.
- [4] 刘欣悦,董磊,王建立. 稀疏采样傅里叶望远镜成像[J]. *光学精密工程*, 2010, 8(3): 521-527.  
LIU X Y, DONG L, WANG J L. Fourier telescope imaging via sparse sampling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 521-527. (in Chinese)
- [5] 朱明,高文,郭立强. 压缩感知理论在图像处理领域的应用[J]. *中国光学*, 2011, 4(5): 441-447.  
ZHU M, GAO W, GUO L Q. Application of compressed sensing theory in image processing[J]. *Chinese Opt.*, 2011, 4(5): 411-447. (in Chinese)
- [6] 郭军伟. 应用 CS 理论实现同步采样压缩成像[J]. *中国光学*, 2009, 2(6): 525-530.  
GUO J W. Imaging system of synchronous sample and compression based on CS theory[J]. *Chinese Opt.*, 2011, 4(5): 411-447. (in Chinese)
- [7] TAKHAR D, LASKA J N, WAKIN M, *et al.*. A new compressive imaging camera architecture using optical domain compression[J]. *Proc. IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging: Computational Imaging*, 2006, 6065: 43-52.
- [8] CHAN W L, CHARAN K, TAKHAR D, *et al.*. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93: 121105-121105-3.
- [9] MA J W. Single-Pixel Remote Sensing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 199-203.
- [10] MA J W. A single-pixel imaging system for remote sensing by two-step iterative curvelet thresholding[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4): 676-680.
- [11] FU W X, ZHU S P, ZHANG K. Conceptual research on application of single pixel infrared imaging to missile guidance[C]. *Asia-Pacific Conference on Information Processing*, 2009: 185-188.
- [12] FILIPE M, FRANCISCO M A, MIGUEL V C, *et al.*. Active illumination single-pixel camera based on compressive sensing[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(4): 405-414.
- [13] HE Z X, TAKAHIRO O, HASEYAMA M. The simplest measurement matrix for compressed sensing of natural images[C]. *Proceedings of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing September*, 2010: 4301-4303.
- [14] MARIO A T F, ROBERT D N, STEPHEN J W. Gradient projection for sparse reconstruction: Application to Compressed Sensing and Other Inverse Problems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1: 586-597.

## 作者简介:



陈 涛(1965—),男,内蒙古赤峰人,工学博士,研究员,博士生导师,2007 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电精密跟踪测量技术的研究。E-mail: chent@ciomp. ac. cn



王 斌(1980—),男,吉林省吉林市人,助理研究员,2003 年于长春光机学院获得学士学位,2006 年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事数值分析、数学最优化以及图像处理与恢复等方面的研究。E-mail: eatingbeen@sohu. com



李正炜(1988—),男,福建龙岩人,硕士研究生,2010 年于中国科技大学获得学士学位,主要从事光学成像探测和数字图像处理等方面的研究。E-mail: lzw5555@mail. ustc. edu. cn



郭 爽(1980—),女,黑龙江鹤岗人,助理研究员,主要从事图像处理、跟踪算法及数据融合等方面的研究。E-mail: guoshuang@ciomp. ac. cn



王建立(1971—),男,山东曲阜人,工学博士,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp. ac. cn

## ● 下期预告

## 红外三色被动测距

路 远<sup>1,2</sup>,冯云松<sup>1,2</sup>,凌永顺<sup>1,2</sup>,乔 亚<sup>1,2</sup>

- (1. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037;
2. 电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点实验室,安徽 合肥 230037)

研究利用比色方法依据空中目标的红外辐射对其进行测距。目标红外辐射在大气中传输时,会受到大气的吸收和散射而衰减,不同波长上衰减的幅度也会有差异。目标在不同波长的辐射强度比值会随着传输距离的改变而发生变化,波长的辐射强度比包含了目标的距离信息。推导了目标辐射强度色比与目标温度、辐射传输距离、大气消光系数之间的关系。在大气消光系数相对固定时,通过测量不同波长的辐射强度比值即可对目标进行测距,推导出了红外三色比距离方程。根据大气辐射传输衰减计算模型,选择了 8.5,9.0,9.5  $\mu\text{m}$  3 个波长作为色比波长,2 km 处 300 K 黑体作为被测目标,画出了色比测距图,图上作业得到的目标距离和温度与目标基本相符。利用本方法通过一次测量即可获得目标的距离和温度。