

基于编码孔径的折反射全向压缩成像技术

娄静涛¹ 李永乐^{1*} 熊立夫²

¹军事交通学院军用车辆系, 天津 300161

²军事交通学院研究生管理大队, 天津 300161

摘要 为解决折反射全向成像分辨率低的问题,设计了一种基于编码孔径的折反射全向压缩成像原型系统。在分析点扩展函数和测量矩阵关系的基础上,提出了基于随机点扩展函数的编码孔径设计方式,并通过中继透镜和空间光调制器实现编码孔径的可编程控制。结合折反射成像特点,基于全向全变分算法实现全向图像稀疏重构,得到高分辨率的全向图像。研究搭建了光学成像硬件平台,通过仿真实验和实际装置实验两个方面验证了折反射全向压缩成像技术的有效性和可行性,有效地解决了折反射全向成像分辨率低的问题,对促进其在相关领域的广泛应用具有重要意义。

关键词 成像系统; 折反射全向成像; 压缩感知; 编码孔径; 随机点扩展函数

中图分类号 TN911 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0411004

Catadioptric Omnidirectional Compressive Imaging Based on Coded Aperture

Lou Jingtao¹ Li Yongle¹ Xiong Lifu²

¹Department of Military Vehicle, Military Transportation University, Tianjin 300161, China

²Postgraduate Training Brigade, Military Transportation University, Tianjin 300161, China

Abstract To solve the problem of low resolution of catadioptric omnidirectional imaging, a system of catadioptric omnidirectional compressive imaging system based on coded aperture is designed. After the analysis of the relationship between point spread function and measurement matrix, the design of coded aperture pattern based on random point spread function is proposed. The coded aperture is programmably controlled with the relay lens and spatial light modulator. The high resolution of omnidirectional image is sparsely reconstructed based on omnidirectional total variation combined the characters of catadioptric imaging. The optic imaging platform is built to verify the effectiveness and practicability of catadioptric omnidirectional compressive imaging through the simulation experiment and actual equipment. The problem of low resolution of catadioptric omnidirectional imaging is solved effectively. The proposed method has important meaning in promoting the applications of catadioptric omnidirectional imaging in related fields.

Key words imaging systems; catadioptric omnidirectional imaging; compressed sensing; coded aperture; random point spread function

OCIS codes 110.1758; 170.1630; 080.2740

1 引言

折反射全向成像技术将曲面反射镜和常规成像透镜相结合,凭借一次性无缝获得360°全方位视野的独特优势,近年来在全景视频监控^[1]、移动机器人视觉导航^[2]、天文观测^[3]等领域得到广泛研究和应用。然而,由

收稿日期: 2015-11-11; 收到修改稿日期: 2015-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(61275016)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCQNJC01000)

作者简介: 娄静涛(1984—),男,博士,讲师,主要从事折反射全向视觉、图像处理、无人驾驶汽车等方面的研究。

E-mail: loujt_1984@126.com

*通信联系人。E-mail: liyongle1984@163.com

于折反射成像具有水平 360°视野,在成像设备物理分辨率固定的情况下,势必导致同一空间目标在成像平面上占有的像素分辨率明显偏低。

针对这一问题,国内外学者分别从软件处理和硬件设计两个方面开展研究。彭启民等^[4]提出了一种基于小波变换的全向图像分辨率增强方法,利用小波系数的自相似性和极值点在各层间的传递性,对全向图像丢失的高频成分进行补偿。Nagahara等^[5]借鉴传统图像超分辨率增强的研究基础,采用旋转或平移全向相机、多聚焦成像等方法,利用多帧全向图或全向视频序列间的时空互补信息,研究全向成像的分辨率增强问题。陈立栋等^[6-7]从硬件设计角度出发,提出一种基于多反射镜面的互补结构折反射全向成像方法,在内外环互补全向图的基础上,通过融合和超分辨率增强得到分辨率均匀的高分辨率全景图像。这些方法虽然在一定程度上提高了全向图像的分辨率,但是受限于香农采样定理,全向图像分辨率的提升有限。

压缩感知(CS)^[8-10]理论的出现为解决折反射成像系统分辨率问题提供了新的思路。娄静涛等^[11-13]基于压缩感知框架研究折反射成像系统的分辨率问题,从理论上证明了通过压缩感知理论进行全向图像分辨率增强的合理性和有效性。然而,前面的研究主要集中在仿真验证层面,没有考虑成像系统的硬件实现问题,即如何通过光学设备的搭建实现压缩采样这个过程。

本文将编码孔径技术引入到折反射全向压缩成像过程,通过研究光学成像系统,实现对场景的全向压缩采样。提出了基于随机点扩展函数的压缩编码孔径掩模设计方案,并采用中继透镜与空间光调制器相结合的方法,实现编码孔径可编程控制。通过结合全向图像特征的全向全变分重构算法,从压缩采样的数据中重构出高分辨率全向图像。

2 编码孔径设计

编码孔径思想是为了在不降低分辨率情况下增加系统的通光量而提出的,克服了小孔成像通光量低,成像质量差的缺陷。利用自然图像在特定变换(如小波变换、傅里叶变换)下稀疏或者可压缩这一先验知识,在忽略噪声影响的情况下,基于编码孔径的压缩成像数学模型可以描述为

$$Y=D(X*h), \quad (1)$$

式中 Y 为传感器得到的观测图像, X 为真实场景, h 为点扩展函数(PSF), $*$ 为卷积操作, $D(\cdot)$ 表示降采样操作。令 \mathbf{y} 、 \mathbf{x} 分别为 Y 和 X 的向量表示形式, (1) 式等价的矩阵-向量乘法(MVM)表达式为

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{A} 是由 h 中的元素构成的卷积核矩阵。通过(2)式可以发现,成像系统可以与CS理论很好地结合到一起。在周期边界条件(PBC)情况下, \mathbf{A} 是一个块循环-循环块矩阵(BCCB),其结构为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & \cdots & \mathbf{A}_n \\ \mathbf{A}_n & \mathbf{A}_1 & \cdots & \mathbf{A}_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_3 & \cdots & \mathbf{A}_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中每个子块 \mathbf{A}_j 是一个循环矩阵

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} h_{1j} & h_{2j} & \cdots & h_{mj} \\ h_{mj} & h_{1j} & \cdots & h_{(m-1)j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{2j} & h_{3j} & \cdots & h_{1j} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 h_{ij} 是PSF中的元素,由此可以看出 \mathbf{A} 的任意一行(一列)都是由PSF中的元素构成。对于具有循环数据结构的矩阵而言,可以通过矩阵某一行的傅里叶变换对其进行特征分解^[14]。因而,压缩采样过程可以利用傅里叶变换来实现,避免了过大尺寸矩阵的存放和操作。

根据数值代数基本理论,对于矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{p \times q}$, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{q \times l}$, 令矩阵 $\mathbf{G} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$ 即 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 的克罗内克积,则矩阵-向量的乘法可以通过下式计算:

$$\mathbf{G}\text{vec}(\mathbf{X}) = \text{vec}(\mathbf{B}\mathbf{X}\mathbf{A}^T), \quad (5)$$

式中 $\text{vec}(\cdot)$ 表示按矩阵列序所拉成的向量。

设 \mathbf{F} 为 $n \times n$ 的一维离散傅里叶变换矩阵, 即 $\mathbf{F} = (\omega^{kl})_{k,l=0,1,\dots,n-1}$, 其中 $\omega = \exp\left(j\frac{2\pi}{n}\right)$ 。根据定义可知道 \mathbf{F} 是对称矩阵, 即 $\mathbf{F} = \mathbf{F}^T$, 则二维离散傅里叶变换矩阵可表示为 $\mathcal{F} = \mathbf{F} \otimes \mathbf{F}$, 根据 (5) 式可以得到, 矩阵 \mathbf{P} 的二维傅里叶变换的向量形式可以表示为

$$\text{vec}[\mathcal{F}2(\mathbf{P})] = \text{vec}(\mathbf{F}\mathbf{P}\mathbf{F}) = \mathcal{F}\text{vec}(\mathbf{P}), \quad (6)$$

由于卷积核矩阵 \mathbf{A} 具有块循环结构, 其特征分解可以通过离散傅里叶变换进行实现^[14], 即

$$\mathbf{A} = \mathcal{F}^{-1} \mathbf{\Lambda} \mathcal{F}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{\Lambda}$ 为 \mathbf{A} 的特征值构成的对角矩阵, 其对角元素为 \mathbf{A} 的某一行的傅里叶变换系数, 因此

$$\mathbf{\Lambda} = \text{diag}\{\text{vec}[\mathcal{F}2(h)]\} = \text{diag}[\mathcal{F}\text{vec}(h)], \quad (8)$$

式中 $\text{diag}(\boldsymbol{\alpha})$ 表示向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 所有元素构成的对角矩阵。

联合 (2)、(7) 和 (8) 式可以得到

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{D}\mathcal{F}^{-1} \mathbf{\Lambda} \mathcal{F}\mathbf{x} = \boldsymbol{\Phi}\mathbf{x}. \quad (9)$$

与 (2) 式相比, (9) 式的优势在于可以通过二维傅里叶变换进行快速求解, 图 1 为 Cameraman 图像按照 (9) 式的成像模型进行成像的中间结果及最终结果。

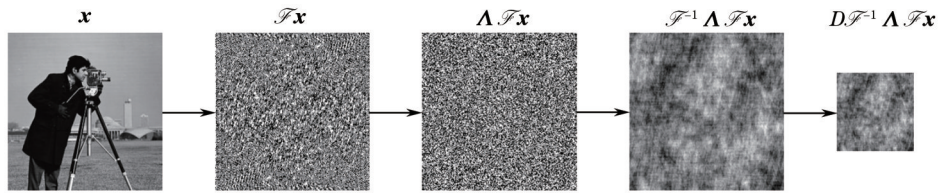


图 1 基于编码孔径的压缩成像过程示意图

Fig.1 Sketch map of compressed imaging based on coded aperture

为了能够精确地从压缩采样的数据恢复出原始信号, 要求测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 必须满足有限等距性质 (RIP)^[15]。根据卷积模型与矩阵-向量模型之间的等价关系: 矩阵 \mathbf{A} 的第一行是成像系统点扩展函数 h 的拉直重组, 当 h 的取值符合某种随机分布时, \mathbf{A} 的第一行必然符合随机分布, 此时, 矩阵 \mathbf{A} 为随机 BCCB 矩阵。Bajwa 等^[16]在文献中证明了当矩阵 \mathbf{A} 为 BCCB 矩阵且第一行符合某种随机分布 (如高斯分布、伯努利分布) 时, 其降采样子集 $\boldsymbol{\Phi}$ 能够很好地满足 RIP 性质。进一步, Rauhut 等^[17]证明了随机循环矩阵的任意子集都满足 RIP 性质。因此, 只需将点扩展函数 h 设计为随机矩阵, 即可使得测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 满足 RIP 条件。

3 全向图像稀疏重构

稀疏重构是压缩采样的逆过程, 在得到观测值 \mathbf{y} 和已知测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 的前提下, 通过求解最小 l_0 -范数重构出原始信号。

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\boldsymbol{\Psi}\mathbf{x}\|_0, \quad s.t. \quad \boldsymbol{\Phi}\mathbf{x} = \mathbf{y}, \quad (10)$$

由于 (10) 式的求解本质上是 NP 难解的, Donoho^[18] 提出采用 l_1 -范数代替 l_0 -范数, 通过转换下式得到 (10) 式的次最优解。

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\boldsymbol{\Psi}\mathbf{x}\|_1, \quad s.t. \quad \boldsymbol{\Phi}\mathbf{x} = \mathbf{y}, \quad (11)$$

图像作为一类特殊的信号, 其稀疏重构是一个大规模稀疏信号的优化问题, 为了获得锐利的边缘, 通常采用全变分 (TV) 最小化算法对 (11) 式进行求解。

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\text{TV}(\mathbf{x})\|_1, \quad s.t. \quad \boldsymbol{\Phi}\mathbf{x} = \mathbf{y}, \quad (12)$$

在折反射全向成像过程中, 由于曲面镜的反射作用, 导致全向图像存在严重变形, 使得基于传统的最小 TV 算法在进行全向图像重构时得到的不是最优解。为了准确地进行全向图像稀疏重构, 采用 Lou 等^[12]提出的全向全变分最小化算法进行全向图像稀疏重构。该算法针对全向图像的成像特点, 基于双向映射计算全向图像梯度。如图 2 所示, 将全向图像中的像素点反投影到柱面全景图像中, 在柱面全景图像中根据梯度计算方法确定水平和垂直方向的相邻像素点, 再将得到的相邻像素点正投影到全向图像中, 找到对应像素点的

相应位置,然后计算梯度值大小,从而得到全向图像的全变分(Omni-TV)。

$$f_{\text{Omni-TV}}(I) = \sum_{(i,j)} \|\nabla I(i,j)\| = \sum_{(i,j)} \sqrt{[I(i+u_1, j+v_1) - I(i,j)]^2 + [I(i+u_2, j+v_2) - I(i,j)]^2} \quad (13)$$

最后,将全向全变分作为正则化约束条件,采用稀疏重构算法恢复出原始全向图像。

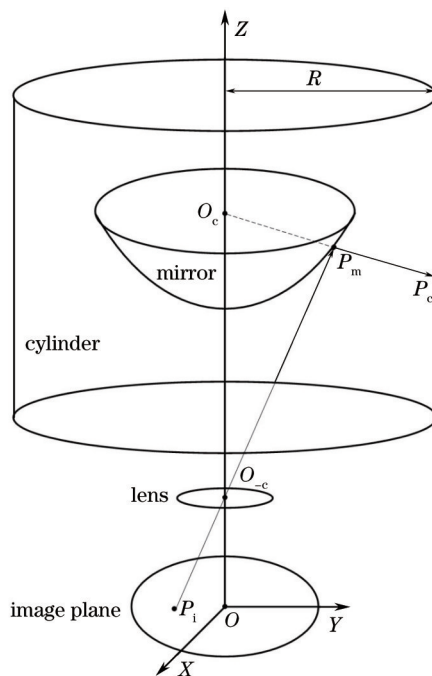


图2 全向图像反投影示意图

Fig.2 Sketch map of backward projection for omnidirectional image

4 实验结果与分析

通过仿真实验的方式,将所提的压缩编码孔径设计方式与 Marcia 等^[19]编码掩模设计方式分别应用于折反射成像,采用基于全向全变分的稀疏重构算法进行重构^[22],并对重构结果进行对比,验证设计方法的准确性与可行性。采用光学器件,设计实现了基于编码孔径的折反射全向压缩成像原型系统,并基于该装置进行实验,验证掩模设计方式可行性。

4.1 仿真实验

构建了如图3所示的基于编码孔径的折反射全向压缩成像系统,并采用 Matlab 软件模拟实现整个成像过程。成像系统采用像元数为 128 pixel×128 pixel 的感光器件,双曲面反射镜的镜面方程为

$$\frac{(z-c)^2}{c^2 \left(\frac{k-2}{k}\right)} - \frac{(x^2+y^2)}{c^2 \left(\frac{2}{k}\right)} = 1, \quad (14)$$

式中双曲面参数 $c = 402.10 \text{ mm}$, $k = 2.8748$, 相机焦距 $f = 20.50 \text{ mm}$, 且相机光心位于双曲面另外一焦点处。在成像系统外设置一个以相机光轴为中心轴的圆柱面,采用压缩感知领域和图像处理领域通常使用的 Cameraman 图像、视力表的局部、Lena 图像以及 Peppers 图像作为贴图构建仿真场景。

编码孔径的掩模分别采用高斯随机分布、伯努利随机分布和 Marcia 设计的掩模,掩模的像元数为 256 pixel×256 pixel。为了进行对比分析,在没有掩模的情况下,利用像元数为 128 pixel×128 pixel 的感光器件对场景进行直接成像,如 4(a)所示,图 4(e)是通过像素内插法将其放大为 256 pixel×256 pixel 的图像作为对比图像;图 4(b)~(d)分别是基于 Marcia 设计的掩模、伯努利掩模以及高斯掩模情况下,感光器件所成的像;图 4(f)~(h)为采用基于全向梯度的全变分最小化算法稀疏重构得到的重建结果。为了便于对比分析图像的主观效果,图 5 对应给出了图 4(f)~(h)在视力表字母部分的局部放大图像,从图中可以看出,基于编码孔径得到的全向图像分辨率都有明显提升,而基于 Marcia 等设计的掩模重建效果与随机高斯、随机伯努利掩模的重建效果主观效果上基本一

致,验证了基于随机方式设计掩模的正确性与可行性。但是,Marcia等设计的掩模需要先设计高维的测量矩阵,然后得到掩模,内存消耗大。这里需要特别说明的是,高斯掩模是一种灰度掩模,掩模上各个单元的取值随机性更高,理论上基于高斯掩模得到的采集数据进行稀释重构能得到更好结果,但是在实际实验是在暗室进行的,整个过程光强比较低,采用高斯掩模进行实际实验时,掩模不同取值情况下得到的采集数据差别非常小,导致重构结果不理想,因此实验采用伯努利二值掩模。

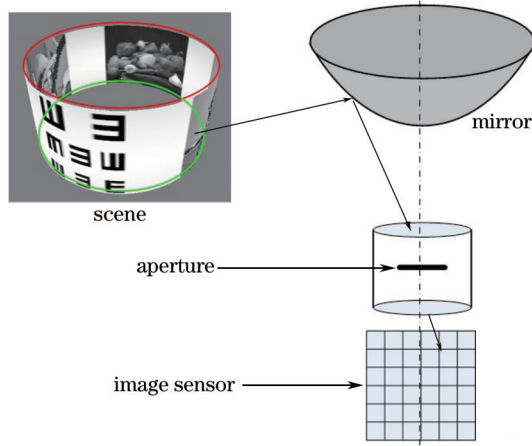


图3 仿真系统示意图

Fig.3 Sketch map of the simulation system

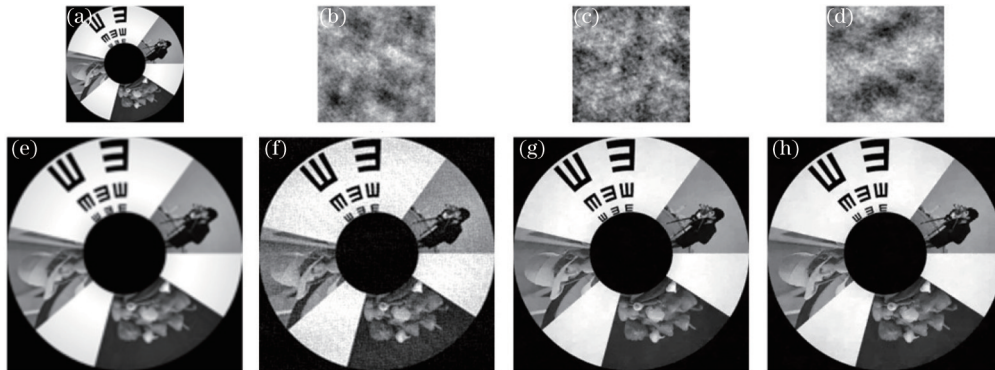


图4 (a) 无掩模采集图像; (b) Marcia掩模采集图像; (c) 伯努利掩模采集图像; (d) 高斯掩模采集图像; (e) 基于图(a)的超分辨率结果; (f) 基于图(b)的重构结果; (g) 基于图(c)的重构结果; (h) 基于图(d)的重构结果
Fig.4 (a) Captured image without mask; (b) captured image with Marcia mask; (c) captured image with Bernoulli mask; (d) captured image with Gaussian mask; (e) super-resolution result from Fig.(a); (f) reconstruction result from Fig.(b); (g) reconstruction result from Fig.(c); (h)reconstruction result from Fig.(d)

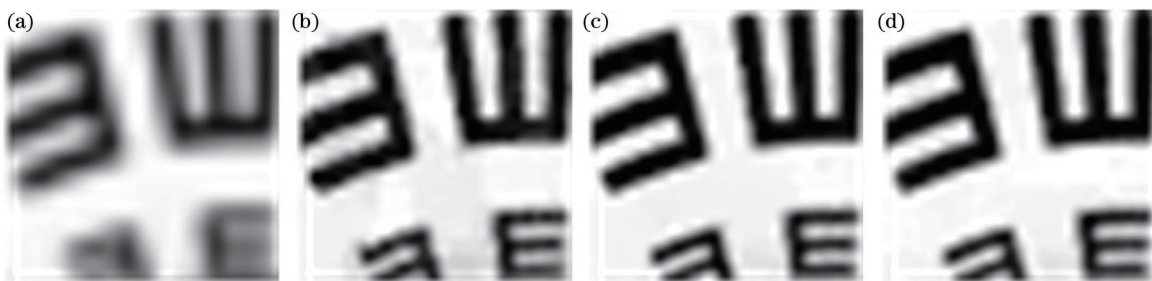


图5 图4(e)~(h)仿真结果的局部放大图

Fig.5 Partial enlarged drawings of simulation results in Fig.4 (e)~(h)

为了客观评价本文方法的正确性,采用像元数为 256 pixel×256 pixel 的感光器件仿真高分辨率成像过程对场景进行直接成像,将得到的图像作为参考图像,分别计算图 4(e)~(h)中重构图像的信噪比(SNR),结果如

表 1 所示。

表 1 不同掩模下重构结果的 SNR 对比

Table 1 Comparison of SNR for reconstruction results at different masks

	Fig.4(e)	Fig.4(f)	Fig.4 (g)	Fig.4 (h)
SNR	14.1776	17.7078	18.9514	19.2348

4.2 实际装置实验

4.2.1 编码孔径实现方式

编码孔径技术通过改变孔径的形状、大小、图案等手段来改变成像系统的 PSF,从而满足不同的需求,如基于散焦的深度估计^[20-21]、光场成像^[22]等。目前,主要通过镜头拆解的方式实现编码孔径,通过对镜头进行分解,将镜头组进行分离,露出镜头的孔径位置,然后将设计好的编码掩模放到孔径位置处^[20],达到改变系统 PSF 的目的。但是这种方式存在许多缺点,如编码的掩模一旦放入镜头后很难进行改变,高分辨率掩模难以制作,且通常实现的都是{0, 1}二值编码,很难实现多值编码等。

为了避免这些缺点,通过光学系统设计,利用中继透镜将孔径位置从镜头内部分离出来,通过空间光调制器(SLM)以可编程的方式实现编码孔径。如图 6 所示,场景中的入射光线通过相机镜头聚焦在虚拟像平面(普通数码相机传感器所在位置),在虚拟像平面后面放置一个中继透镜,两者之间的距离为中继透镜的焦距,在中继透镜后焦距位置放置一个 SLM(图 6 为透射式 SLM),通过改变 SLM 各个像素点的值对入射光进行编码,以 8 bit 位深的 SLM 为例,255 表示透光,0 表示遮光。最后编码的光线通过另外一个中继透镜聚焦到成像传感器。

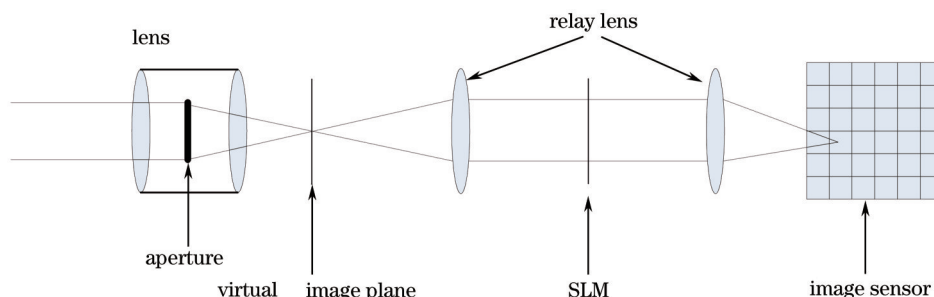


图 6 本文编码孔径实现方式

Fig.6 Realization way of the proposed coded aperture

4.2.2 硬件平台

根据前面设计的编码孔径实现方式,设计了基于编码孔径的折反射全向压缩成像系统,如图 7 所示。图中 1 为激光器,2 为扩束镜,3 为双曲面反射镜,4 为成像镜头,5、8 均为中继透镜,6 为偏振光束分光器(PBS),7 为反射式硅基液晶设备(LCoS),9 为成像传感器。为了提高光能利用率,降低衍射效应,选择反射式 LCoS 作为空间光调制器对光线进行编码调制,选择四维公司的 SXGA-R2 作为 LCoS 进行实验,其详细参数如表 2 所示,实验时 LCoS 有效利用的分辨率为 960 pixel×960 pixel。

表 2 LCoS 详细参数

Table 2 Detailed parameters of LCoS

Display type	Reflective LCoS
High resolution	1280 pixel×1024 pixel
Active are	17.43 mm×13.95 mm
Pixel pitch	13.62 mm×13.62 μm
Contrast ratio	>200:1
Reflectivity	60%
Pixel fill factor	93%

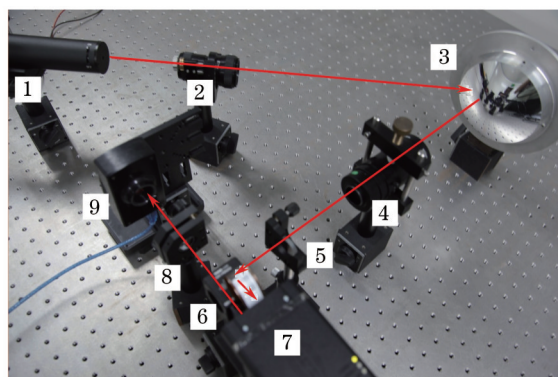


图7 折反射全向压缩成像平台

Fig.7 Platform of catadioptric omnidirectional compressive imaging system

激光器通过激光扩束镜为整个系统提供高质量平行光,降低噪声影响;双曲面反射镜能够为整个系统提高更宽广的成像视角,由于实验条件所限,为了能够稳定的固定所有实验器材,整个成像系统采用横置的方式固定在实验平台上。成像镜头位于双曲面的另一个焦点处,与双曲面镜构成单视点折反射成像系统,实验中采用 Computar MLH-10X 变焦镜头,焦距范围为 15~45 cm,实验时设定的焦距为 25 cm;中继透镜距成像镜头的距离为镜头焦距与中继透镜焦距之和,通过该设计将镜头的孔径位置移到中继透镜后焦距位置,这里选用 Edmund 公司的非球面消色差透镜作为中继透镜,型号及参数详如表 3 所示。偏振光束分光器通过反射和透射将光线分为平行(S)和垂直(P)两个偏振方向,P 方向偏振光反射到 LCoS 进行调制,如果 LCoS 上像素值为 255,则将 P 方向偏振光转变为 S 方向偏振光透过偏振光束分光器,如果 LCoS 上像素值为 0,偏振光方向不发生改变,在偏振光束分光器反射后沿原光路返回。实验采用的偏振光束分光器型号为 Edmund 公司的 #49002。中继透镜 8 的型号与 5 相同,它将调制后的光聚焦到相机传感器,实验所采用的相机为 Lumenera LU075 CCD 相机,分辨率为 640 pixel×480 pixel,由于全向图像为圆形,所以有效分辨率为 480 pixel×480 pixel。

表 3 中继透镜参数

Table 3 Parameters of relay lens

Type	Edmund #49665
Diameter	25 mm
Effective focal length	50 mm
Back focal length	44.12 mm
Edge thickness	7.42 mm
Operating temperature	-20 ℃~80 ℃

4.2.3 实验结果与分析

将图 8(a)的成像物体置于激光扩束镜和双曲面反射镜之间进行成像实验;图 8(b)是基于图 7 的实验装置,在无掩模情况下成像传感器采集得到的图像;图 8(c)是采用伯努利编码掩模进行成像得到图像,两者分辨率均为 480 pixel×480 pixel;图 8(d)基于图 8(b)采用传统的超分辨率方法得到的分辨率为 960 pixel×960 pixel 的全向图像;图 8(e)是利用全向全变分稀疏重构算法从图 8(c)恢复出的分辨率为 960 pixel×960 pixel 的全向图像,图中红色虚线内为折反射全向成像区域。实验结果验证了所提思路在进行全向图像分辨率增强时原理上的可行性。

但由于实验是在暗室进行的,整个过程光强比较低,当不采用掩模进行编码时,光线经过曲面镜反射后直接成像在成像传感器上,光强损失较小,成像噪声较低;而采用编码掩模编码后,光线在传感器成像前,先要经过偏振光束分光器分光,然后经反射式 LCoS 编码成像,这两个过程都将进一步削弱光的强度,加大成像噪声。同时,由于数字微镜阵列的不均匀反射和漫反射使得实验结果与传统超分辨率结果相比具有较大的噪声。

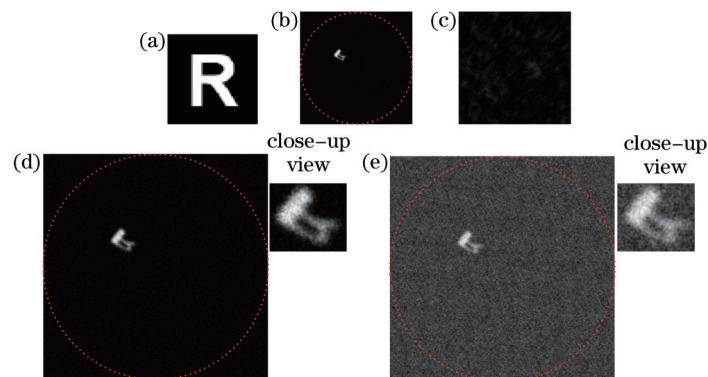


图 8 实验结果。(a) 原始图像; (b) 无掩模采集图像; (c) 伯努利掩模采集图像; (d) 基于图(b)超分辨率结果; (e) 基于图(c)重构结果

Fig.8 Experimental results. (a) Original image; (b) captured image without mask; (c) captured image with Bernoulli mask;

(d) super-resolution result from Fig.(b); (e) reconstruction result from Fig.(c)

5 结 论

从系统设计与硬件平台搭建出发,讨论了压缩感知的实际实现及其在折反射成像中的应用。介绍了编码孔径成像的基本思想,对编码孔径成像进行分析,提出了随机点扩展函数的掩模设计方式,克服了测量矩阵过大的缺陷。在进行编码孔径物理实现时,与以往拆分镜头的方式不同,采用中继透镜和空间光调制器实现孔径掩模的可编程控制。仿真实验结果和实际装置实验结果表明,所提设计思路对折反射全向压缩成像具有可行性和有效性。此外,该研究对于折反射全向成像在视频监控、机器人导航等领域的推广应用发挥了重要作用,也推动了压缩感知技术从理论研究到压缩成像实际应用的发展。下一步工作将研制更加紧凑的折反射压缩成像系统,将镜头、空间光调制器、中继透镜以及成像传感器通过加工精密套筒,组装到一起,以缩小装置体积,增加密封性和可操作性,从而方便地与曲面反射镜组成垂直放置的全向成像系统,以达到对自然场景进行水平方向 360°成像的目的。另外,虽然基于全向全变分进行稀疏重构,较好地考虑了折反射成像的特点,但是全变分的计算需要经过双向映射过程,邻域像素位置的计算存在四舍五入,也给重构结果带来不利影响,因此将对如何提高成像质量和去除成像噪声作进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Boulton T E, Gao X, Micheals R, *et al.*. Omnidirectional visual surveillance[J]. *Image and Vision Computing*, 2004, 22(7): 515-534.
- 2 Lopez-Nicolas G, Guerrero J J, Sagues C. Multiple homographies with omni-directional vision for robot homing[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(6): 773-783.
- 3 Lü Bo, Liu Weiqi, Zhang Daliang, *et al.*. Optical system design of large entrance pupil catadioptric star sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0716002.
吕 博, 刘伟奇, 张大亮, 等. 折反射式大入瞳星敏感器光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0716002.
- 4 Peng Qimin, Jia Yunde. Wavelet-based resolution enhancement of omnidirectional images[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 32(11): 1875-1879.
彭启民, 贾云得. 基于小波变换的全向图像分辨率增强方法[J]. *电子学报*, 2005, 32(11): 1875-1978.
- 5 Nagahara H, Yagi Y, Yachida M. Resolution improving method from multi-focal omnidirectional images[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2001, 1: 654-657.
- 6 Chen Lidong, Wang Wei, Zhang Maojun, *et al.*. Design analysis of a complementary double mirror catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3487-3494.
陈立栋, 王 炜, 张茂军, 等. 双反射面互补结构的折反射全向成像系统设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3487-3494.
- 7 Chen L D, Lou J T, Zhang M J, *et al.*. Fusion of complementary catadioptric panoramic images based on nonsubsampled contourlet transform [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 127002
- 8 Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- 9 Candès E J, 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.

- 10 Wu Jianrong, Shen Xia, Yu Hong, *et al.*. Snapshot compressive imaging by phase modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1011005.
吴建荣, 沈 夏, 喻 虹, 等. 基于相位调制的单次曝光压缩感知成像[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1011005.
- 11 Lou Jingtao, Tan Shuren, Li Yongle, *et al.*. Superresolution omnidirectional image reconstruction based on non-uniform measurement [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(12): 2421-2429.
娄静涛, 谭树人, 李永乐, 等. 基于非均匀测量矩阵的超分辨率全向图像重建[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(12): 2421-2429.
- 12 Lou J, Li Y, Liu Y, *et al.*. Omni-gradient-based total variation minimisation for sparse reconstruction of omni-directional image[J]. *IET Image Processing*, 2014, 8(7): 397-405.
- 13 Lou Jingtao, Li Yongle, Tan Shuren, *et al.*. Sparse reconstruction for omnidirectional image based on total variation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 42(2): 243-249.
娄静涛, 李永乐, 谭树人, 等. 基于全变分的全向图像稀疏重构算法[J]. *电子学报*, 2013, 42(2): 243-249.
- 14 Zou Mouyan. Deconvolution and signal recovery[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001.
邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- 15 Candès E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing[J]. *Academic des Sciences*, 2008, 346(9): 589-592.
- 16 Bajwa W U, Haupt J D, Raz G M, *et al.*. Toeplitz-structured compressed sensing matrices[C]. *Proceedings of the 2007 IEEE/SP 14th Workshop on Statistical Signal Processing*, 2007: 294-298.
- 17 Rauhut H, Romberg J, Tropp J A. Restricted isometries for partial random circulant matrices[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2012, 32(2): 242-254.
- 18 Donoho D L. For most large underdetermined systems of linear equations, the minimal L1 norm solution is also the sparsest solution[J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2006, 59(6): 797-829.
- 19 Marcia R F, Harmany Z T, Willett R M. Compressive coded aperture imaging[C]. *Proceedings of the SPIE Electronic Imaging: Computational Imaging VII*, 2009.
- 20 Zhou C, Lin S, Nayar S K. Coded aperture pairs for depth from defocus and defocus deblurring[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2011, 93(1): 53-72.
- 21 Li Yongle, Wang Wei, Lou Jingtao, *et al.*. Defocus deblurring for catadioptric omnidirectional imaging based on coded aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511004.
李永乐, 王 炜, 娄静涛, 等. 基于编码孔径的折反射全向成像去散焦模糊技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0511004.
- 22 Liu Yongchun, Gong Huajun, Shen Chunlin. Research of light field acquisition and reconstruction based on mask[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0810001.
刘永春, 龚华军, 沈春林. 基于掩膜的光场采集与重建的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0810001.

栏目编辑: 史 敏