

引用格式: ZHOU Liang, LIU Kai, LIU Zhao-hui, *et al.* Optically Multiplexed Imaging for Increased Field of View[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9):0911001

周亮, 刘凯, 刘朝晖, 等. 光学复用大视场成像研究[J]. 光子学报, 2020, 49(9):0911001

# 光学复用大视场成像研究

周亮, 刘凯, 刘朝晖, 段晶, 李治国

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

**摘 要:** 为了简化光学复用成像系统复杂度和降低对编码方式的要求, 基于反射镜旋转完成通道编码, 构建了结合分束镜和光学成像系统实现双通道混叠成像的实验装置. 为实现混叠图像的有效解混叠, 提出了利用特征点检测与匹配方法实现多幅混叠图像之间平移量的自动识别, 进而构建出具有亚像素精度的双通道光学复用成像系统的系统复用矩阵, 并采用梯度投影稀疏重建算法完成基于多幅图像的双通道图像重建, 最终实验实现了光学成像系统视场角的 2 倍放大. 此外, 对所提方法在其他场景的适应性也进行了实验验证, 表明了其可在不改变焦平面探测器的情况下实现光学成像系统视场角的有效放大, 大大节约了大视场光学成像系统的研制成本.

**关键词:** 复用成像; 大视场; 通道编码; 复用矩阵; 解混叠

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0911001

## Optically Multiplexed Imaging for Increased Field of View

ZHOU Liang, LIU Kai, LIU Zhao-hui, DUAN Jing, LI Zhi-guo

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** In order to simplify the multiplexing architecture and encoding method, a two-channels multiplexed imaging architecture was constructed with rotation encoding mirror, beamsplitter and optically imaging system. The subpixel accuracy shifts between superimposed images were proposed to automatically decide with features detection and registration. The system multiplexed matrices were built with the known shifts and the gradient projection for sparse reconstruction method was adopted to reconstruction the respective scene based on six frames. The increase of field of view was verified with 2 times in the proposed realistic setting. Also, the proposed method can successfully disambiguate other scenes, which demonstrates its wide range of application. This method can effectively increase the field of view with the same focal plane array, and can be cost effective in developing wide field of view optically imaging system.

**Key words:** Multiplexed imaging; Wide field of view; Channel encoding; Multiplexed matrix; Disambiguation

**OCIS Codes:** 110.1758; 100.3190; 120.4820; 230.1360

## 0 引言

一般采用分辨率和视场角对光学系统的成像能力进行表征, 对于现如今大多数的成像系统来说, 其分辨能力由探测器像元大小决定. 在焦平面探测器给定的前提下, 为了获得高分辨率的图像, 需要光学系统自身有足够的放大率, 而这点恰恰制约着系统的视场角. 因此, 一般在光学成像系统设计之初都需要在系统分辨

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.61805275), 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(No.XAB2017B27)

**第一作者:** 周亮(1989—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为计算成像和组织光学. Email: zhouliang@opt.ac.cn

**收稿日期:** 2020-05-26; **录用日期:** 2020-07-01

<http://www.photon.ac.cn>

率和视场角之间进行权衡.但是在很多实际应用场景中,往往需要打破分辨率和视场角之间的这种相互制约关系.例如,对于中、长波红外成像系统来说,该波段下的焦平面探测器的价格依旧比较昂贵,这就对能够在较少像元数的情况下实现大视场成像的相关技术提出了迫切的需求.

至今,用于克服视场角和分辨率之间矛盾的方法大都基于获取多幅图像并结合后续图像处理来实现.图像拼接方法<sup>[1]</sup>通过获取场景不同区域的图像,后利用图像拼接达到分辨率不变而视场角增大的目的.该方法需获取同一场景下具有重叠区域的多幅图像,对于视频成像系统来说,这就意味着系统需要在帧率内完成对各区域的扫描成像,这对于传统视频成像系统来说是个挑战.图像超分辨方法,通过获取同一场景下具有不同亚像素偏移的多幅图像,结合多帧图像超分辨方法来克服焦平面探测器的分辨率限制,进而达到视场角不变而分辨率提高的目的<sup>[2-3]</sup>.该方法需要通过对运动系统的精确控制或者亚像素图像匹配算法<sup>[4]</sup>来获知同一场景下各图像的亚像素偏移量,对于焦平面探测器像元尺寸较小的情况,该已知条件往往需要微米级的运动控制或匹配精度,然而这在受振动和温度变化影响的实际工作环境下实现是相当困难的.

近年来,研究人员基于单个像素同时对多目标点成像的原理提出光学复用成像技术,该技术获得的图像是不同成像通道图像在同一焦平面探测器叠加的混叠图像.混叠方式通常有:多个不同朝向光学系统将各自视场对应的场景成像至同一焦平面探测器<sup>[5]</sup>;分束镜级联将不同视场偏转至光学系统分振幅成像<sup>[6]</sup>;交错微棱镜阵列置于光学系统前使系统各子孔径对不同视场成像<sup>[7]</sup>以及阵列反射镜各单元偏摆实现光学系统对不同视场场景的分孔径成像<sup>[8]</sup>等.在上述混叠方式中,多光学系统成像方式系统较为复杂;分束镜级联方式体积比较庞大;交错微棱镜方式虽然结构紧凑,但是会引入色散和畸变失真;反射镜阵列并不会降低成像质量,但是会增大系统体积,且会引入像旋.

单幅复用混叠图像对场景是欠采样的,若没有额外的混叠信息或者场景的先验知识就无法完成对其有效的解混叠.尽管可以在复用混叠图像中进行目标检测,但是鉴于检测出的目标可能来自于任何一个成像通道,目标的角度位置仍然是不确定的.为此,需要对各成像通道进行单独编码以实现对各成像通道混叠图像的解混叠.编码机制分为时间编码和空间编码.时间编码通过快门、反射镜平移、通道图像偏转等方式完成,适用于信息丰富的稠密场景<sup>[9]</sup>.空间编码则通过点扩散函数工程实现各成像通道图像的唯一编码,适用于稀疏场景,如点源探测或星体跟踪等<sup>[10-11]</sup>.

在前述研究基础上,为了简化光学复用成像系统复杂度和降低对编码方式的要求,本文通过反射镜旋转完成通道(视场)的独立编码,结合分束镜和光学成像系统实现多幅双通道混叠图像的获取.为实现混叠图像的有效解混叠,需已知两通道间的相互偏移量,而该偏移量的判读误差,甚至是亚像素误差,都会导致图像解混叠不完全.为此,提出利用特征点检测与匹配方法实现多幅混叠图像之间平移量的自动识别,进而利用平移量构建出双通道光学复用成像系统的亚像素精度系统复用矩阵,并采用梯度投影稀疏重建算法<sup>[12]</sup>完成基于多幅图像的双通道图像重建,最终实验实现光学成像系统视场角的2倍放大.

## 1 成像模型

光学复用成像技术基于焦平面探测器的单个像素同时对多目标点成像,因此其所成图像每个像元的灰度值是对应各通道像元灰度值的叠加,如图1所示.而解混叠过程由于自身的欠定性,一般很难由单一混叠图像重建出各通道图像.鉴于此,必须已知混叠图像的像素灰度值在各通道间是如何分配的,这就相当于已知各通道的混叠方式.通过通道间图像的相互偏移可以成功实现混叠图像的解混叠.

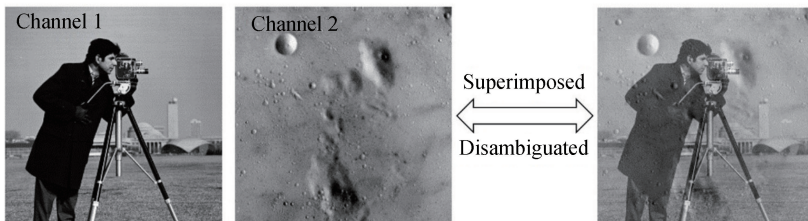


图1 双通道混叠和解混叠示意图

Fig.1 Superimposed two images and their disambiguations

为了易于实现,重点考虑双通道复用成像,通过反射镜的旋转实现通道图像间的偏移,结合分束镜使光

学成像系统获得多幅双通道不同偏移量的混叠图像,根据已知偏移量实现双通道图像的有效解混叠,达到光学成像系统视场 2 倍放大的目的.双通道复用成像装置示意图如图 2 所示.

由前述光学复用成像原理可知,光学复用成像的成像方程可描述为

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$  为光学成像系统获得的混叠图像,  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times l}$  为混叠矩阵,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{l \times 1}$  为被成像场景,  $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$  为高斯白噪声.

针对本文双通道光学复用成像装置,反射镜的旋转会导致通过分束镜反射成像的场景相对于透过分束镜成像的场景有一个相对偏移量,上述成像方程可进一步表述为

$$\mathbf{y} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{S}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} + \mathbf{n} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $\mathbf{S}$  为通道 2 相对于通道 1 的偏移矩阵,  $\mathbf{x}_1$  表示静止的通道 1 场景,  $\mathbf{x}_2$  表示由反射镜旋转导致图像偏移的通道 2 场景.

## 2 解混叠算法

将双通道复用成像方程改写为

$$\mathbf{y} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{S}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} + \mathbf{n} = \mathbf{M}\mathbf{W}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_1 \\ \boldsymbol{\theta}_2 \end{bmatrix} + \mathbf{n} = \mathbf{M}\mathbf{W}^{-1} \boldsymbol{\theta} + \mathbf{n} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{M} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{S}]$  表示双视场复用矩阵,  $\mathbf{W}^{-1}$  表示逆小波变换,  $\boldsymbol{\theta}$  为小波系数.解混叠相当于光学复用成像方程的求逆问题,该问题是欠定和病态的,即便是采用多幅混叠图像求解,直接求伪逆法解混叠也易受噪声影响.为此,采用梯度投影稀疏重建算法进行混叠图像进行解混叠,其可表述为一非线性最小化优化问题

$$\boldsymbol{\theta}_e = \operatorname{argmin} \|\mathbf{y} - \mathbf{M}\mathbf{W}^{-1} \boldsymbol{\theta}\|_2^2 + \tau \|\boldsymbol{\theta}\|_1 \quad (4)$$

式中,  $\boldsymbol{\theta}_e$  表示经  $l^2 - l^1$  范数优化后的小波系数,  $\tau$  为惩罚因子,其值越大图像越平滑.

为进一步提高解混叠精度和重建图像质量,采用对多幅混叠图像进行同时求解,以此重建出双通道各自的场景图像.

$$\boldsymbol{\theta}_a = \operatorname{argmin} \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{M}_n \end{bmatrix} \mathbf{W}^{-1} \boldsymbol{\theta} \right\|_2^2 + \tau \|\boldsymbol{\theta}\|_1 \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{1e} \\ \mathbf{x}_{2e} \end{bmatrix} = \mathbf{W}^{-1} \boldsymbol{\theta}_a \quad (6)$$

式中,  $\boldsymbol{\theta}_a$  表示多幅图像同时经  $l^2 - l^1$  范数优化后的小波系数,  $\mathbf{x}_e$  为估计的双通道图像.

解混叠算法的成功实现依赖于复用矩阵  $\mathbf{M}$  已知,即偏移矩阵  $\mathbf{S}$  已知,且要求具有亚像素精度,否则会影响解混叠图像质量,易造成解混叠不完全并在图像中出现伪影现象,如图 3 所示.可以看出,当取整数像元对具有亚像素偏移量的混叠图像进行解混叠时,重建图像(c)中仍含有明显的残留伪影,而这点在取正确偏移量解混叠结果(d)中明显减少,说明亚像素精度平移量的获取有助于提升重建图像的质量.

因此,一般通过事先标定反射镜转角与图像偏移量之间的拟合关系来获得混叠图像间的偏移量.鉴于事先标定需要已知反射镜旋转的角度值,本文为了简化双通道复用成像装置,不再采用事先标定方法,而是直接利用特征点检测与匹配算法实现多幅混叠图像间 X、Y 两方向亚像素精度平移量的判断,并以此构建 X、Y 两方向具有亚像素精度偏移的系统复用矩阵,再结合前述解混叠算法即可有效实现双通道图像的重建.

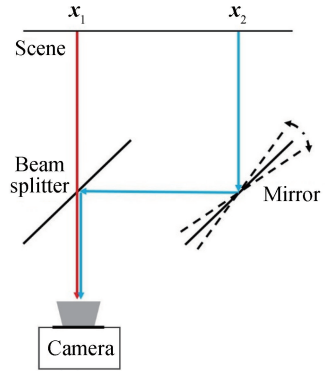


图 2 双通道复用成像装置示意图

Fig.2 Two-channels multiplexed imaging architecture

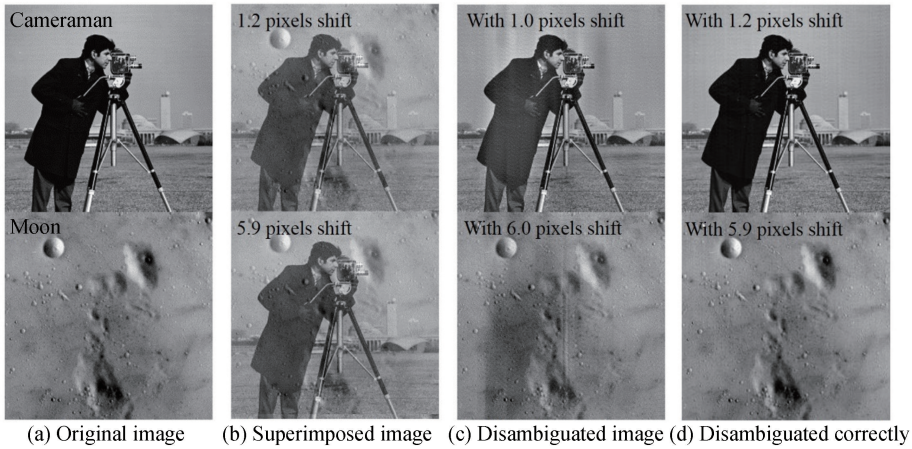


图3 解混叠结果对比图  
Fig.3 Disambiguation results

### 3 实验及讨论

为验证光学复用成像技术扩大光学成像系统视场的能力,参照光学复用成像原理以及双通道复用成像装置示意图,搭建如图4所示实验样机.该实验样机主要由反射镜、分束镜、旋转台、镜头、CMOS探测器等构成.

实验时,反射镜将光学成像系统视场外的场景图像偏转至分束镜后到达光学成像系统探测器靶面,并与光学成像系统视场内场景图像重叠.通过旋转旋转台实现反射光路和透射光路图像间的相互偏移,以此获得多幅具有不同通道间偏移量的混叠图像.所获得的混叠图像如图5所示.

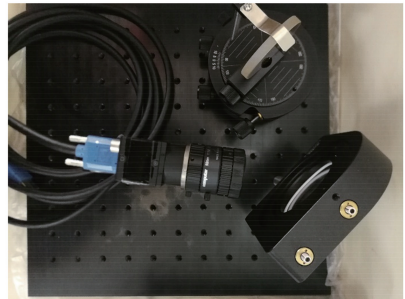


图4 实验样机  
Fig.4 Two-channels multiplexed imaging system



图5 六幅具有通道间不同偏移量的混叠图像  
Fig.5 Six superimposed images with different relative shifts

采用特征点检测与匹配算法实现通道间偏移量的估计,以此省去旋转角度与平移量之间的事先标定过

程.平移量估计时,选取第一帧图像作为参考图像,通过特征点检测与匹配估计出其余图像与第一帧图像的仿射变换矩阵,该矩阵包括了旋转角度与  $X$ 、 $Y$  两方向的平移量.借助  $X$ 、 $Y$  两方向的平移量可实现系统复用矩阵的构建,进而达到图像解混叠的目的.前述六幅图像的特征点检测与匹配结果如图 6 所示,其中  $X$  方向的正值定义为图像向左偏移、 $Y$  方向的正值定义为图像向上偏移,为了更加直观表现平移量的大小和方向,只截取了前述六幅图像的部分区域进行显示.

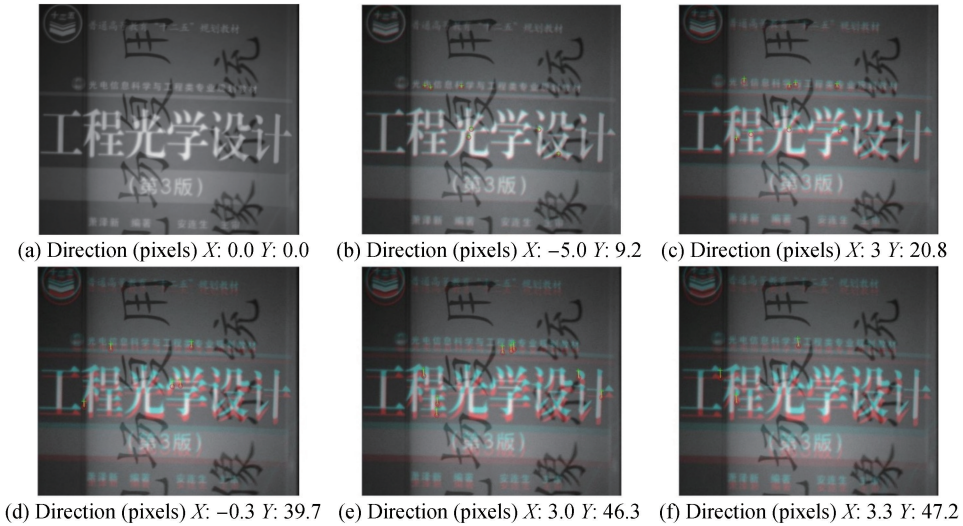


图 6 特征点检测与匹配结果

Fig.6 Features detection and registration

根据  $X$ 、 $Y$  两方向的亚像素偏移量,构建具有亚像素精度的通道偏移矩阵,进而采用 6 幅混叠图像同时对双通道场景图像进行最优化求解,重建结果如图 7 所示,可以看出该方法可从混叠图像中有效分离出双通道各自的场景图像,证明了光学复用成像技术具备扩大成像系统视场角的能力.

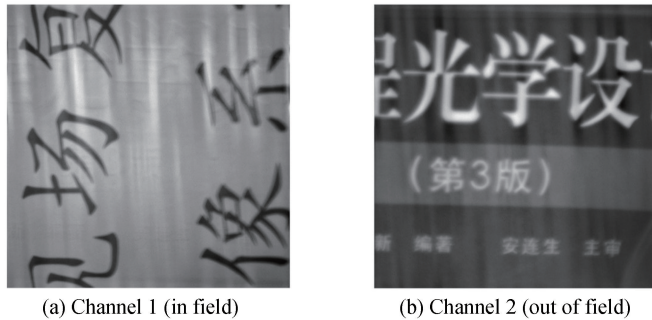


图 7 双通道光学复用解混叠图

Fig.7 Disambiguation results

为充分验证该方法的可行性和应用场景适应性,对其他场景采用实验样机进行双通道混叠成像,并进行与前述解混叠过程相同的处理,所获得的双通道重建结果如图 8 所示.由各场景重建结果图可看出,通过重建算法可以很好地将混叠图像分解成通道 1 和通道 2 的场景图像,验证了基于光学复用技术的前述双通道复用成像实验装置能够有效实现原始光学成像系统视场角的 2 倍放大,且具有较好的应用场景适应性.

可进一步可发现重建结果中具有残留的伪影,导致该结果的根本原因是由通道间不同相互偏移量构成的系统复用矩阵是欠定的,在对各通道场景图像进行重建时易受到噪声的干扰.增加系统复用矩阵的条件数能够有效改善重建图像的质量.具体措施有:1)通道间偏移量不易过大,一般应控制在几个像元;2)尽量使通道间偏移量的大小和方向不同;3)使用更多幅的混叠图像进行同时优化求解;4)提高偏移量的标定精度.

此外,为了简化实验装置,本文仅进行双通道复用成像实验,但是该方法可扩展于复用通道数更多的应用场景,从而在不改变焦平面探测器的情况下实现光学成像系统视场角更大倍数的放大,克服了传统光学成像系统视场角与分辨率之间的矛盾,可有效节约大视场光学成像系统的研制成本.

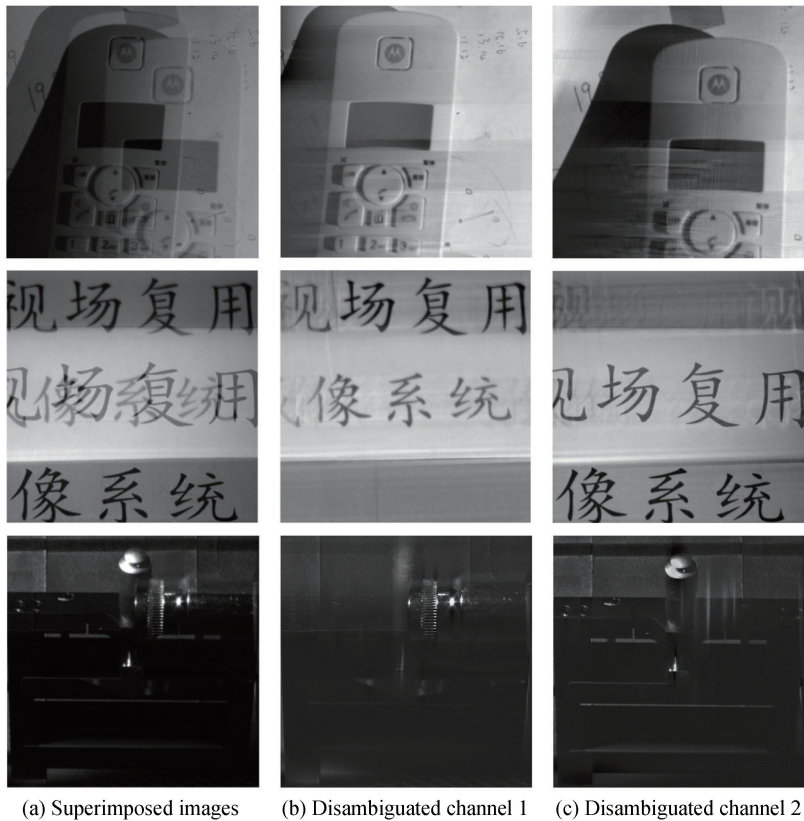


图8 不同场景混叠图像及其重建结果

Fig.8 Superimposed images and their corresponding reconstructions

## 4 结论

本文阐明了光学复用成像机理,论述了基于多幅混叠图像的梯度投影稀疏解混叠算法,搭建了基于反射镜和分束镜的双通道光学复用成像装置.鉴于亚像素精度偏移误差会导致解混叠图像中的伪影增加,提出了采用特征点检测与匹配算法实现多幅混叠图像通道间偏移量的判定,并构建了具有亚像素精度的系统复用矩阵,结合解混叠算法最终实现双通道各自场景图像的重建.旋转双通道光学复用成像装置中的反射镜获取场景多幅不同混叠图像,采用六幅混叠图像同时进行双通道各自场景图像的重建,实验结果表明该方法可从混叠图像中有效分离出双通道各自的场景图像,具备扩大光学成像系统视场角的能力.文中虽然仅进行双通道复用成像实验,但是该方法可扩展至复用通道数更多的应用场景.该方法可在不改变焦平面探测器的情况下实现光学成像系统视场角的放大,克服了传统光学成像系统视场角与分辨率之间的矛盾,大大节约了大视场光学成像系统的研制成本.

### 参考文献

- [1] SZELISKI R. Image mosaicing for tele-reality applications[C]. IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 1994, 44-53.
- [2] PARKS C, PARK M K, KANG M G. Super-resolution image reconstruction: A technical overview[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003, **20**(3): 21-36.
- [3] HARDIE R C, BARNARD K J, BOGNAR J G, *et al.* High-resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system[J]. *Optical Engineering*, 1998, **37**(1): 247-260.
- [4] IRANI M, PELEG S. Improving resolution by image registration [J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1991, **53**(3): 231-239.
- [5] STENNERM D, SHANKAR P, NEIFELD M A. Wide-field feature-specific imaging[C]. OSA, 2007: FMJ2.
- [6] MARCIAR F, KIM C, ELDENIZ C, *et al.* Superimposed video disambiguation for increased field of view[J]. *Optical Express*, 2008, **16**(21):16352-16363.
- [7] CHEN C Y, YANG T T, SUN W S. Optics system design applying a micro-prism array of a single lens stereo image pair [J]. *Optical Express*, 2008, **16**(20): 15495-15505.

- [8] SHAH V, RACHLIN Y, SHEPARD R H, *et al.* Shift-encoded optically multiplexed imaging[J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**(4): 041314.
- [9] SHEPARD R H, RACHLIN Y, SHAH V, *et al.* Design Architectures for optically multiplexed imaging[C]. SPIE, 2015, **9600**: 960003.
- [10] HORISAKI R, TANIDA J. Multi-channel data acquisition using multiplexed imaging with spatial encoding[J]. *Optical Express*, 2010, **18**(22): 23041-23053.
- [11] UTTAMS, GOODMAN N A, NEIFELD M A, *et al.* Optically multiplexed imaging with superposition space tracking [J]. *Optical Express*, 2009, **17**(3): 1691-1713.
- [12] MARCIA R F, KIM C, KIM J. *et al.* Fast disambiguation of superimposed images for increased field of view[C]. IEEE Xplore Conference: Image Processing, 2008: 2620-2623.