

## 单镜头大视场拼接系统成像分析与控制设计

张 祥<sup>1,2</sup>, 高云国<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 100049)

**摘要:** 为了满足远距离目标捕获的需求, 提出了一种单镜头大视场拼接成像方法, 设计了实验样机对其进行验证, 对样机的成像特性进行了分析。介绍了样机的结构设计和相机曝光控制流程, 然后根据该成像方法通过控制相机连续圆锥旋转实现大视场成像的特点, 分析了样机成像的像移特性及样机结构运动精度对子图像正确拼接的影响, 最后设计了在样机运转过程中使相机准确对子视场曝光的控制参数。实验中将样机参数代入分析结果进行了计算, 得出了成像的像移大小, 并对由相机运动误差导致的子图像拼接偏差进行了校核。计算得出了相机的曝光控制参数, 最终获得了拼接正确的大视场图像。通过对实验样机的成像特点进行分析, 为该单镜头大视场拼接方法在激光对抗系统中的工程应用奠定了基础。

**关键词:** 目标捕获; 视场拼接; 像移分析; 圆锥旋转

**中图分类号:** TB852.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0118001

## Imaging analysis and control design of large field of view stitching system with a single lens

Zhang Xiang<sup>1,2</sup>, Gao Yunguo<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 100049, China)

**Abstract:** A large field of view stitching method with a single lens was proposed to meet the requirement of remote target capture. An experimental prototype was designed to verify the method, and the imaging characteristics of the prototype were analyzed. The structural design of the prototype and the camera exposure control process were introduced. Then according to the imaging method, by controlling the continuous conic rotation of the camera to realize large-field imaging, the image motion feather of the prototype and the influence of the motion tolerance on the correct splicing of the sub-images were analyzed. At last the control parameters were designed to make the camera expose to the proper field when the prototype was in running. In the experiment, the parameters of the prototype were substituted into the analysis results, the image motion value was obtained by calculation, and the stitching deviation of the sub-images caused by the camera motion error was checked. Finally the large

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-09-17

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程(061X20C060)

作者简介: 张祥(1993-), 男, 博士生, 主要从事靶场目标跟踪方面的研究。Email: zhangxiang2014@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 高云国(1955-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电仪器总体设计方面的研究。Email: gaoyunguo@163.com

field image that was stitched correctly was obtained according to the camera exposure control parameters obtained by calculation. The imaging characteristics of the experimental prototype were analyzed, which laid the foundation for engineering application of the large-field stitching method.

Key words: target capture; field of view stitching; image motion analysis; cone rotation

## 0 引言

在远距离目标捕获系统中,使用光电设备对远距离进入目标进行捕获时,使用引导雷达给出的目标坐标存在一定程度的误差,当使用长焦相机对目标进行捕获成像时,由于 CCD 限于当前制造工艺的发展其尺寸较小,导致长焦相机的视场很小,无法满足目标捕获要求。一些系统中使用多个长焦相机组成阵列来解决该问题,通过控制相机视轴之间存在一定夹角来实现大视场成像<sup>[1-4]</sup>。但多相机阵列体积和质量大,由于对目标进行捕获成像时需要将相机安装于跟踪转台上,而跟踪转台的成本随载荷的增大而指数级快速增加,因此使用多相机阵列时大大增加了捕获系统整体的成本<sup>[5]</sup>。而且多个长焦相机的使用增加了成像系统本身的成本,尤其是在使用红外相机的情况下。参考文献[6]介绍了一种使用单个相机实现大视场高分辨成像的系统,将相机搭载于可实现偏转和俯仰的云台上,通过控制相机沿着特定的指向方位变换,顺序指向不同的视场区域曝光,然后将各子图像拼接为完整的大视场图像<sup>[6]</sup>。该系统虽然扩大了相机的视场范围,但由于使用了云台控制相机调整位姿,扫描效率低,只适用于对静态场景成像。对文中所描述的应用场景,将相机搭载于跟踪转台上同样可以控制相机进行指向变换来实现大视场成像,但由于成像帧频低,无法满足对运动目标进行捕获的要求。

文中提出一种大视场拼接成像系统,通过控制长焦相机进行连续圆锥旋转变换位姿模拟多相机阵列,实现对大视场区域成像。由于工作在连续旋转状态下,相机需要在运动过程中进行图像采集,这样就导致系统的成像相对于多相机阵列系统呈现不同的特点。设计了实验样机对该大视场成像方法进行验证,对样机的成像特点进行了分析,文中对此进行介绍。

## 1 系统方案设计和实验样机介绍

### 1.1 系统方案设计

文中提出的成像系统以机械结构控制单个相机进行圆锥旋转变换位姿来实现大视场成像。如图 1 所示,该系统通过控制相机在对应到特定的子视场时曝光,获得 4 幅有一定重合的子图像,然后拼接为完整的大视场图像。通过以高帧频对视场进行连续扫描,实现对目标的大视场范围捕获。该设计概念本质上是通过控制相机进行圆锥旋转变换位姿来模拟多相机阵列成像,通过控制相机运动实现对视场的高速扫描。与之相似的是一种摆镜扫描系统,该系统在相机镜头前安装旋转反射镜,光路经反射镜转折后进入相机,成像时通过控制反射镜旋转实现对大视场的扫描<sup>[7-11]</sup>。但该系统只能在一个方向上实现视场扩展,在另一个方向上扩展视场需要并列拼接多套系统<sup>[9-11]</sup>。

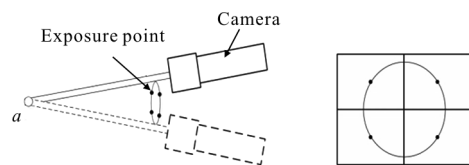


图 1 大视场成像系统原理图

Fig.1 Schematic of the large field of view imaging system

### 1.2 实验样机的结构设计

如图 2 所示,样机结构由基座、左轴承座、左关节轴承、相机支撑架、相机、右关节轴承、右轴承座、驱动轴、深沟球轴承、深沟球轴承座和电机等组成。相机固定于相机支撑架上,支撑架由左、右关节轴承夹持,左、右关节轴承分别安装于左、右轴承座内。其中左轴承座固定于基座上,右轴承座固定于驱动轴上随驱动轴旋转。驱动轴以两个深沟球轴承夹持,由电机提供旋转动力。以驱动轴的轴线作为系统轴线,控制左关节轴承的外圈轴线与系统轴线

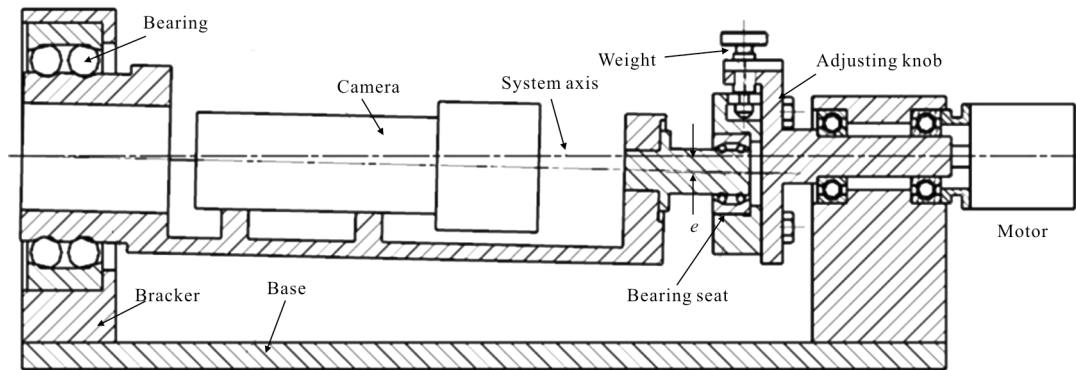


图 2 实验样机工作原理图

Fig.2 Working principle sketch of the experiment prototype

重合,右关节轴承的外圈轴线与系统轴线错开一定偏心距  $e$ ,这样在电机带动驱动轴旋转时支撑架就会带动相机以左关节轴承中心点为顶点,以相机视轴为母线,以系统轴线为轴线做圆锥旋转。设计了微调旋钮来调节偏心距,微调旋转通过细螺纹与驱动轴连接,底端通过卡槽与右轴承座连接,通过旋转微调旋钮控制右轴承座上下运动。设计了球杆与卡槽配合的机构来约束相机绕自身轴线的自由度(如图 3 所示)。球杆固定连接于相机支撑架上,卡槽固定于左轴承座上,球杆的球部分夹持于卡槽中。在相机旋转时球杆的球部分相对卡槽会有一定程度的旋转和滑动,而卡槽约束了球上下运动的自由度,从而约束相机绕自身轴线旋转的自由度。

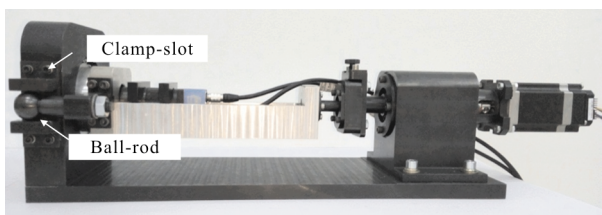


图 3 实验样机照片

Fig.3 Photo of the experiment prototype

### 1.3 相机曝光控制流程

系统运转时电机控制驱动轴进行匀速旋转,在驱动轴上安装了旋转编码器,如图 4 所示,使用 DSP 芯片采集编码器信号来测量其实时旋转角度,并在相机旋转到特定角度时发出触发信号控制相机曝光。同时 DSP 与电脑通信告知该帧子图像在视场中的相对位置用于图像拼接。在每个运动周期中电脑将各子图像根据其相对位置进行拼接,然后显示于屏幕上。

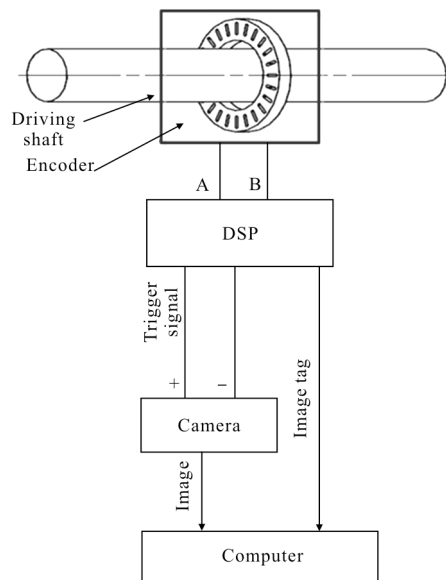


图 4 相机曝光控制流程

Fig.4 Camera exposure control flow

## 2 实验样机的成像分析

对多相机阵列,由于各相机的相对位置固定,因此使用固定的参数对各子图像进行拼接。文中所提出的大视场成像系统控制单个相机圆锥旋转扫描视场来模拟多相机阵列,为了覆盖尽可能大的视场,各子图像的重合量很小,无法使用图像拼接算法进行拼接,因此与多相机阵列一样,以固定的参数对其进行拼接。由于各子图像是在运动过程中拍摄的,相对于多相机阵列图像的采集呈现出不同的特点,给图像的正确拼接带来了困难,该节对此进行分析。

### 2.1 样机成像的像移分析

由于相机处于连续运动状态,在曝光时相机仍

然会运动一定角度,因此系统采集到的图像存在一定程度的像移,这也是影响图像清晰度的主要因素。图5所示为相机曝光过程中成像器件运动示意图,b、d点为成像器件角点,c点为成像器件中心点,也是相机视轴对应点。由图可知,由于相机绕视轴的自由度被约束,因此在任意时刻都处于平动状态,可得在任意时间段内成像器件每个像元相对视场的像移相等,而且曝光时视轴在视场内扫过一小段圆弧。

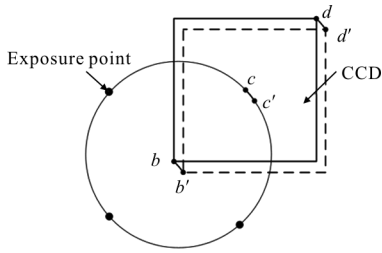


图5 曝光时成像器件移动示意图

Fig.5 Motion sketch of the image sensor during exposure

以成像器件中心点c为例对相机曝光时的像移进行分析。图6所示为相机在某一时刻的示意图, $\theta$ 为相机圆锥旋转的顶角,a点为相机圆锥旋转顶点,p点为相机投影点, $r_1$ 为c点离系统轴线的距离, $r_2$ 为p点离系统轴线的距离,pc为相机焦距,其值为f。

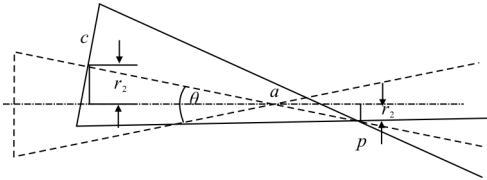


图6 系统工作状态示意图

Fig.6 State sketch of the system in working

图7所示为图6所示状态的俯视图。在相机圆锥旋转时pc始终过a点,假设相机曝光时pc转过角度 $\delta$ ,p点运动至p'点,c点运动至c'点,则由原来c点对应的物点发出的光线经p'点投影至q点,可知 $\Delta s$ 为系统成像的像移量。

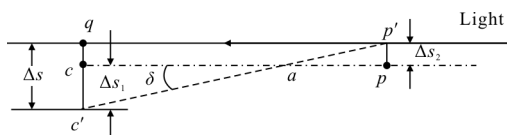


图7 相机运动时像移关系简图

Fig.7 Image motion sketch of the camera in moving

由其几何关系可得:

$$\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 \quad (1)$$

假设曝光时间为 $\Delta t$ ,相机圆锥旋转角速度为 $\omega$ ,得:

$$\delta = \omega \cdot \Delta t \quad (2)$$

则图中c点位移 $\Delta s_1$ 为 $r_1 \cdot \omega \cdot \Delta t$ ,p点位移 $\Delta s_2$ 为 $r_2 \cdot \omega \cdot \Delta t$ ,可得:

$$\Delta s = r_1 \cdot \omega \cdot \Delta t + r_2 \cdot \omega \cdot \Delta t \quad (3)$$

由图6可知:

$$r_1 + r_2 = f \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4)$$

综合公式(3)、(4)可得:

$$\Delta s = f \cdot \omega \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \Delta t \quad (5)$$

当图像的像移达到一定程度时,图像会严重退化,导致目标的具体形态无法识别,因此 $\Delta s$ 需小于某特定值。设系统对完整视场图像采集的帧频为k,即相机做圆锥旋转的转速为k,则其角速度 $\omega$ 为 $2\pi k$ 。假设可接受的最大像移为 $\Delta s_p$ ,对特定的视场其曝光时间为 $\Delta t_p$ ,得:

$$k < \frac{\Delta s_p}{2\pi \cdot f \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \Delta t_p} \quad (6)$$

由公式(6)可得当镜头焦距f和圆锥旋转顶角 $\theta$ 一定时,通过减小曝光时间可以增大k值的范围,因此使用高灵敏度的相机有利于增大系统的帧频。

## 2.2 结构运动精度对成像的影响

由于运动误差的存在,相机每次到达同一曝光点对应的视场可能存在一定偏差。由于以固定的参数对子图像进行拼接,为了防止子图像错位严重导致重合区域图像模糊,系统结构需要有高的运动精度。

由图2可知影响相机运动精度的主要因素是轴承的跳动。图8所示为系统结构简图,l为两个调心球轴承之间的距离, $\zeta$ 为两个深沟球轴承之间的距离, $\lambda$ 为右侧调心球轴承和右侧深沟球轴承之间的距离。设e、f、h、i处轴承的跳动误差分别为 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_4$ (跳动误差向上为正),得g点处的跳动 $t_g$ 为:

$$t_g = \frac{\lambda \cdot \varepsilon_3 - (\lambda - \zeta) \cdot \varepsilon_4}{\zeta} \quad (7)$$

e点和f点处跳动 $t_e$ 和 $t_f$ 为:

$$\begin{cases} t_e = \varepsilon_1 \\ t_f = t_g + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (8)$$

可得在垂直于相机的运动方向上  $e_f$  的偏转角  $\Delta\theta$  为:

$$\Delta\theta = \frac{(t_e - t_f) \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2}}{l} \quad (9)$$

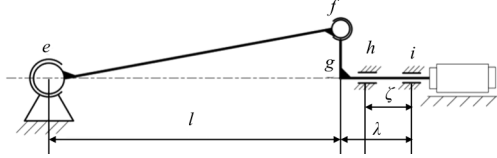


图 8 相机运动控制机构简图  
Fig.8 Sketch of the camera motion control structure

$e_f$  的偏转会导致相机轴线发生偏转以及对应视场产生偏差,图 9 所示为其示意图, $e_f$  偏转后  $p$  点运动至  $p''$  点, $c$  点运动至  $c''$  点,由原来  $c$  点对应的物点发出的光线经  $p$  点投影至  $o$  点,可知目标上一点在成像器件上像的位移为  $\Delta u$ ,由其几何关系可得:

$$\Delta u = f \cdot \Delta\theta \quad (10)$$

即:

$$\Delta u = f \cdot \frac{[\zeta \cdot \varepsilon_1 - \zeta \cdot \varepsilon_2 - \lambda \cdot \varepsilon_3 + (\lambda - \zeta) \cdot \varepsilon_4] \cos^2 \frac{\theta}{2}}{\zeta \cdot l} \quad (11)$$

假设图中右侧两曝光点对应夹角为  $\beta$ (如图 9 所示),相机像元尺寸为  $v$ ,则由机构运动误差导致的图像在横向、竖向上错位为:

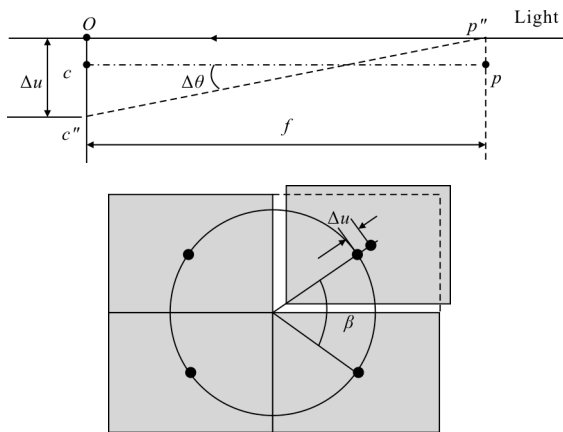


图 9 (a) 相机运动误差导致对应视场发生偏移示意图;

(b) 相机运动误差导致图像拼接偏差示意图

Fig.9 (a) Schematic of the camera's field of view deviation caused by its motion error; (b) mismatch of the sub-images caused by the camera motion error

$$\begin{cases} \Delta m = \frac{\Delta u \cdot \cos \frac{\beta}{2}}{v} \\ \Delta n = \frac{\Delta u \cdot \sin \frac{\beta}{2}}{v} \end{cases} \quad (12)$$

### 3 相机曝光控制参数设计

由 1.1 节分析可知,相机成像器件在曝光过程中整体平动一段圆弧,而对于不同亮度的场景或目标,所需相机的曝光时间不同,由公式(5)可知对应的圆弧大小不同。为了使各子图像正确拼接,需要控制相机准确对各子视场曝光,这里准确曝光定义为该圆弧的中点位于曝光点上。

图(10)所示为系统视场示意图,编码器零点对应位置位于左侧,驱动轴旋转  $\frac{\beta}{2}$  后相机对应第一个曝光点,然后分别旋转  $\gamma, \beta, \gamma$  后相机对应到第二、三、四个曝光点。假设成像器件像元数为  $m \times n$ , 对应视场重合量为  $x, y$ , 拼接后得系统总像元数为  $(2m-x) \times (2n-y)$ 。可得系统总视场角  $\psi$  为:

$$\psi = 2 \cdot \arctan \frac{\sqrt{(2m-x)^2 + (2n-y)^2} \cdot v}{2f} \quad (13)$$

相机圆锥旋转顶角  $\theta$  为:

$$\theta = 2 \cdot \arctan \frac{\sqrt{(m-x)^2 + (n-y)^2} \cdot v}{2f} \quad (14)$$

相机曝光点间隔的旋转角度  $\beta, \gamma$  为:

$$\begin{cases} \beta = 2 \cdot \arctan \left( \frac{2n-y}{2m-x} \right) \\ \gamma = 2 \cdot \arctan \left( \frac{2m-x}{2n-y} \right) \end{cases} \quad (15)$$

为了控制相机准确曝光,需要在每个曝光点提前触发相机。假设在曝光时间内相机转过的角度为  $\delta$ ,可知对应每个曝光点相机需提前  $\frac{\delta}{2}$  开始曝光。设编码器的细分数为  $z$ ,则 4 个曝光开始点对应的细分度间隔分别为  $\left( \frac{\beta}{2} - \frac{\delta}{2} \right) \cdot \left( \frac{z}{2\pi} \right), \frac{\gamma}{2} \cdot z, \frac{\beta}{2\pi} \cdot z, \frac{\gamma}{2\pi} \cdot z$ 。假设系统完整视场采集帧频为  $r$ (frame/s),即驱动轴旋转速度为  $r$ (r/s),可得  $\delta$ (rad):

$$\delta = 2\pi \cdot r \cdot \Delta t \quad (16)$$

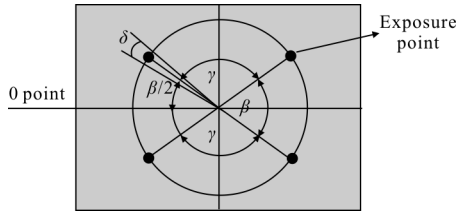


图 10 系统视场示意图

Fig.10 Sketch of the system field of view

## 4 实验

使用该样机进行了实验。采用了焦距为 300 mm 的镜头,相机成像器件的像元数为 752×480,像元尺寸为 6 μm,可得相机的视场角为 1.02°。通过调节微调旋钮控制相邻子图像重合量为 50 列像素,得完整图像的像元数为 1 454×910,代入公式(13)得系统总视场角为 1.96°,代入公式(14)得相机圆锥旋转顶角为 0.94°,代入公式(15)得曝光点间隔的旋转角度 β、γ 分别为 64°、116°。采用了增量式编码器,线数为 1 024,经倍频后获得细分数为 4 096。曝光时间为 500 μs,驱动轴转速为 3 r/s,即帧频为 3 frame/s,代入公式(5)得图像像移为 23 μm。代入公式(16)得相机曝光过程中转过的角度为 0.009 rad,可得由旋转零点开始控制相机曝光的细分数间隔设置为: 362, 1 318, 730, 1 318。

由于无法直接对轴承的运动误差进行测量,因此在对相机运动精度进行计算时采用了国家标准中规定的轴承径向跳动公差值。采用了 P4 级精度的轴承,样机中所安装轴承的代号分别为 1 512、1 500、6 204、6 204,根据 GB/T307.1-2005 中的规定,其径向跳动  $K_{ia}$  为 4、2.5、3、3 μm<sup>[12]</sup>。为了计算相机最大运动误差,设  $\varepsilon_1$  为 4 μm、 $\varepsilon_2$  为 -2.5 μm、 $\varepsilon_3$  为 -3 μm、 $\varepsilon_4$  为 3 μm,样机 λ 为 112 mm、ζ 为 72 mm,代入公式(11)得由于机构运动误差导致的图像在成像器件上最大可能位移为 12 μm,代入公式(12)得子图像相对理想位置在两个维度上最大可能错位 1.68、1.04 个像元。值得说明的一点是,国家标准中给出的公差是轴承跳动的最大允许值,其实际产生的跳动肯定是在公差带中变动,而且两个深沟球轴承在增加预紧力的情况下其径向跳动值会减小,因此系统稳定运行时图像错位小于该计算值,可以保证子图像拼接时不出现大的错位导致模糊。

图 11 所示为样机所采集的大视场图像,由图可知样机正确对各子视场进行了曝光,子图像拼接正确,重合区域清晰,可以满足目标捕获的要求。

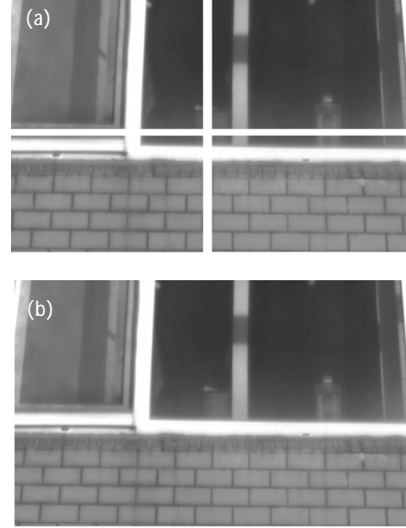


图 11 (a) 实验中样机所采集图像; (b) 拼接后获得的大视场图像

Fig.11 (a) Image collected by the prototype in the experiment; (b) large field of view image after stitching

## 5 结论

针对一种应用于远距离目标捕获的单镜头大视场拼接成像方法,设计了实验样机对其进行验证。首先介绍了样机的结构设计和控制流程,然后分析了样机成像的像移特性,以及样机结构运动精度对图像拼接的影响,最后设计了准确对子视场曝光的控制参数。实验中根据分析结果控制相机对子视场曝光,拼接后获得了清晰的大视场图像,样机使用视场角度为 1.02°的相机,获得了 1.96°的大视场。

该大视场拼接系统通过控制相机运动扩大了视场,成像时不可避免地存在一定程度的像移,影响图像质量。在对远距离暗弱目标成像跟踪时,由于一般根据目标影像形心对其方位进行测量<sup>[13-14]</sup>,由像移导致的拖影等会带来额外的测量误差,因此在使用大视场对目标捕获完成后可以使相机停止旋转,控制相机对目标凝视成像,实现监控和跟踪。

## 参考文献:

- [1] Wang W, Song L W, Qiao Y F, et al. External field stitching technology for high speed target measuring and its implementation [J]. Opt Precision Eng, 2010, 18

- (9): 2069-2076. (in Chinese)  
王旻, 宋立维, 乔彦峰, 等. 外视场拼接测量技术及其实现[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2069-2076.
- [2] Pollock D B, Reardon P J, Rogers T E, et al. Multi-lens array system and method: U.S., 9182228[P]. 2015-11-10.
- [3] Lu Yu. Research on the key technology of large field of view and ultra-high resolution camera [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)  
卢钰. 大视场超高像素相机关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [4] Liu Hao, Wei Zhiqiang, Li Zhen, et al. The research and implementation of a multi-camera system [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(3): 128-135. (in Chinese)  
刘昊, 魏志强, 李臻, 等. 一种多相机系统的研究与实现[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 128-135.
- [5] San X, Qiao Y, Yu S, et al. Optimization design and simulation analysis for the key components of 1m aperture photoelectric theodolite [C]//International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies. International Society for Optics and Photonics, 2014: 92800K.
- [6] Sargent R, Bartley C, Dille P, et al. Timelapse GigaPan: capturing, sharing, and exploring timelapse gigapixel imagery[C]//Fine International Conference on Gigapixel Imaging for Science, 2010.
- [7] Yu Yang, Wang Shiyong, Jian Yi, et al. Realization of an optical system based on continuous-scan focal plane array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 0118002. (in Chinese)  
于洋, 王世勇, 蹇毅, 等. 面阵探测器连续扫描成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0118002.
- [8] Lin Sen, Cai Wei, Wei Xiaolin, et al. Design of image space scanning system with tilt mirror for cooled medium wave infrared optical system [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017, 37(4): 16-19, 65. (in Chinese)  
林森, 蔡伟, 魏小林, 等. 带摆镜的制冷型中波红外像方扫描光学系统设计[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(4): 16-19, 65.
- [9] Wang Min. Use PID mathematic arithmetic to control motor[J]. Modern Electronics Technique, 2005(4): 82-84. (in Chinese)  
王敏. 扫描摆镜控制的数字PID实现 [J]. 现代电子技术, 2005(4): 82-84.
- [10] Yuan Ye, Qiu Jun, Wang Zhilei, et al. Study on design of scanning mirror system for area array imaging [J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(6): 72-77. (in Chinese)  
袁野, 裘俊, 王智磊, 等. 结合面阵成像的摆镜扫描系统设计研究[J]. 上海航天, 2016, 33(6): 72-77.
- [11] Mao Bonian, Meng Xin, Bian Chunjiang, et al. Servo control system in two-dimensional coupled optics swing mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 544-548. (in Chinese)  
毛博年, 孟新, 卞春江, 等. 二维耦合光学摆镜伺服控制系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 544-548.
- [12] National Standardization Technical Committee. GB/T 307.1—2005. Quantities and units [S]. Beijing: China Standard Press, 2005. (in Chinese)
- [13] Yang Wei, Fu Yaowen, Pan Xiaogang, et al. Track-before-detect technique for dim targets: an overview [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42 (9):1786-1793. (in Chinese)  
杨威, 付耀文, 潘晓刚, 等. 弱目标检测前跟踪技术研究综述[J]. 电子学报, 2014, 42(9): 1786-1793.
- [14] Jin Zefenfen, Hou Zhiqiang, Yu Wangsheng, et al. Multiple feature fusion based on covariance matrix for visual tracking [J]. Acta Optical Sinica, 2017, 37(9): 0915005. (in Chinese)  
金泽芬芬, 侯志强, 余旺盛, 等. 基于协方差矩阵的多特征融合跟踪算法[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0915005.