

文章编号 1004-924X(2010)09-2069-08

## 外视场拼接测量技术及其实现

王 旻<sup>1,2</sup>, 宋立维<sup>1</sup>, 乔彦峰<sup>1</sup>, 余 毅<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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 由于单台高速摄像机无法满足高速测量领域对大视场、高帧频、高分辨力和高数据量处理的要求, 本文对通过外视场拼接来实现大视场角目标测量的技术进行了研究。在分析和比较各种拼接方式的基础上, 提出了由 4 个测量相机的外视场拼接实现大视场测量的系统方案。4 台测量相机以“田”字型配置在跟踪架水平轴两端, 拼接后在视场上实现了“一”字型大视场测量。采用提出的方案, 设计和研制了外视场拼接测量系统样机。采用视场角为  $10^\circ$  的镜头进行视场拼接, 实际拼接后最大视场为  $40^\circ$ (方位)  $\times 10^\circ$ (高低); 视差为 360 mm 时, 目标距摄像机大于 247 m 无盲区, 可以拍摄到完整的图像。

**关 键 词:** 外视场拼接; 高速摄像; 高速测量; 外视场测量系统。

中图分类号: TP391.4; TB872 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20101809.2069

## External field stitching technology for high speed target measuring and its implementation

WANG Min<sup>1,2</sup>, SONG Li-wei<sup>1</sup>, QIAO Yan-feng<sup>1</sup>, YU Yi<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

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

**Abstract:** As a single high-speed camera can not meet the requirements of high-speed target measurement for large fields, high frame rates, high resolutions and large volume data processing, the high speed target measuring technology completed by external field stitching was researched. On the basis of analysis and comparison of external field stitching methods, a ultimate scheme of external field stitching with external fields from four cameras was proposed. In the scheme, two cameras were mounted at one side along the horizontal axis of a 'T' type tracking frame and the others were at the other side. A prototype of external field stitching measuring system made of four lenses with  $10^\circ$  field-angle was designed, and its actual stitching field of view is  $40^\circ$  (horizontal)  $\times 10^\circ$  (vertical). When the parallax is 360 mm, the complete image can be obtained for the target over 247 m away from the cameras without blind spots.

收稿日期: 2009-10-15; 修订日期: 2009-12-11.

基金项目: 粤港关键领域重点突破项目 (No. 2004A10403021); 广东省科技攻关项目 (No. 2006A10401006)

**Key words:** external field stitching; high-speed imaging, high speed measuring, external field measuring system

## 1 引言

高速摄像技术在交通、航空、航天、汽车安全测试等领域得到了广泛的应用,尤其是在大视场目标的测量中起到了重要的作用,目前国内外的 高速摄像机已经实现了大靶面、高帧频、大存储容量等功能<sup>[1-4]</sup>。由于目标高速测量领域内被测目标多且小,同时要求有高帧频,因此不但要求视场大(往往横向要比纵向大好几倍),而且要求有高分辨力,高数据量和高数据速率。目前应用单台高速摄像机已经不能满足上述要求,需要进行视场拼接来实现大视场角的多目标测量。本文在分析和比较了各种视场拼接类型和拼接方式的基础上,针对摄像距离为 500 m~1 km,视场角为 40°以及被测目标的形状和尺度的需求,提出并实现了由 4 个测量相机上下、左右对称地配置在“T”字型跟踪架水平轴外伸两轴端上,组成“田”字型布局,在视场上实现“一”字型拼接的外视场拼接测量系统,并分析了其拼接效果和外视场拼接的实现。

## 2 视场拼接类型和拼接方式的选取与比较

### 2.1 视场拼接的类型

视场拼接一般可以分为两种类型,一类为内拼接<sup>[5-7]</sup>,又称为像方拼接;另一类为外拼接<sup>[8]</sup>,又称物方拼接。

#### 2.1.1 内拼接(像方拼接)

内拼接又有多种形式,可以在第一像面上用多个面阵图像探测器直接拼接,称直接拼接法;也可以在第一像面之后借助于光学零件,将视场的不同部分成像到各自的面阵图像探测器上进行视场拼接,称光学拼接法。

#### 2.1.1.1 图像探测器直接拼接法

根据视场的大小和视场纵横的比例,确定拼接的图案,也可以是横向连续拼接数块,称“横一”字形拼接;可以是纵向连续拼接数块,称“纵 1”型拼接;也可以进行 2 块×2 块的“田”字型拼接,称“田”字型拼接法,如图 1 所示。

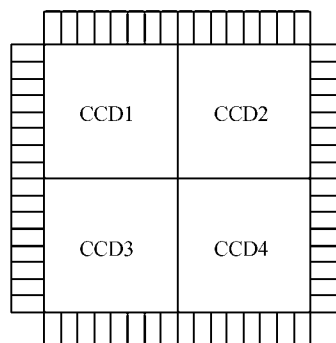


图 1 图像探测器的直接拼接示意图

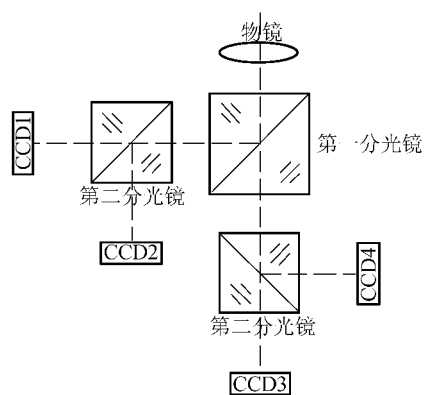
Fig. 1 Stitching of image detector

这种拼接方法的缺点其一是必须研制特殊图像探测器,不能应用市场上采购的器件,如图 1 所示,图像探测器的两个端边不能有引出导线,而且此端边的几何形状和尺寸精度应该符合直接拼接的要求;其次是由于光学镜头视场很大,视场中心到视场边缘不可避免地有很大的渐晕,产生像面照度明显的不均匀<sup>[9]</sup>;再次,用这种方法拼接方阵时,最多实现 4 块,实现“田”字型拼接。

#### 2.1.1.2 图像探测器光学拼接法

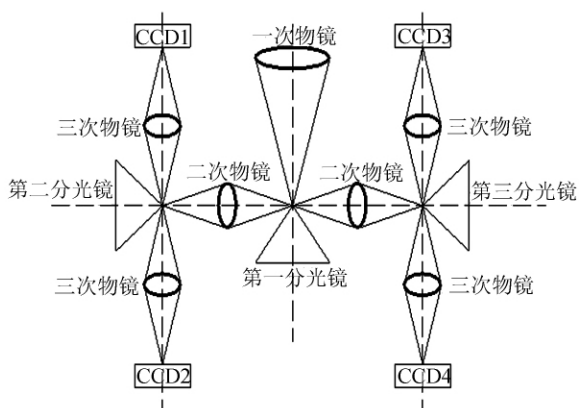
用半反半透镜进行拼接是最简单的方法,如图 2(a)所示。用半反半透镜进行拼接的缺点首先是能量利用率低,用一级分光时(即进行二块图像探测器拼接),能量的最大利用率为 50%,而用二级分光时(即进行 4 块图像探测器拼接),能量的最大利用率仅仅为 25%;其次分光次数越多,要求光学镜头的后截距越长,有时这种结构要求是无法实现的。

也可以采用棱锥反射镜再加上二次成像来实现光学拼接,如图 2(b)所示,即实现 4 块图像探测器的拼接,与半反半透镜拼接相比,该方法克服了能量利用率低的缺点,但实现起来技术上比较复杂。



(a) 半反半透镜拼接

(a) Optical stitching of half-reflected and half-transmitted prisms



(b) 棱锥分光镜加二次成像实现光学拼接

(b) Optical stitching by reflected pyramids and secondary imaging

图2 光学拼接示意图

Fig. 2 Optical butting

### 2.1.2 外拼接(物方拼接)

将几台高速摄像机按精密计算的角度进行组合,成为具有大视场覆盖的多目标高速摄像系统,称为物方外拼接。

### 2.2 外拼接方式的选取与比较

外拼接一般来说可分为“横一”字方式拼接,“纵一”字方式拼接和“田”字方式拼接等3种。目标高速景像测量系统一般由3台独立的大视场、高分辨力、高帧频凝视测量相机组成,进行交汇测量。解算其中任意2台的测量数据,就可以获得目标在空间的位置和运动参数。第3台作为备份,目的是提高测量的成功概率,还可以通过获得数据进一步处理来提高系统的测量精度。

从单台测量相机的凝视等待测量原理来说,无须配备二轴精密转台,但是将多台测量相机组合成系统,就需要将每台中的多个测量相机单元装配到同一个二轴精密转台上来满足各个测量相机单元光轴位置之间的精密几何关系;同时需要通过该二轴转台,对各台测量相机坐标系之间位置进行精确定位,建成一个统一的坐标系。因此,这里结合二轴转台的构型来分析测量相机的配置方式。

#### 2.2.1 测量相机在二轴精密轴台上的结构配置

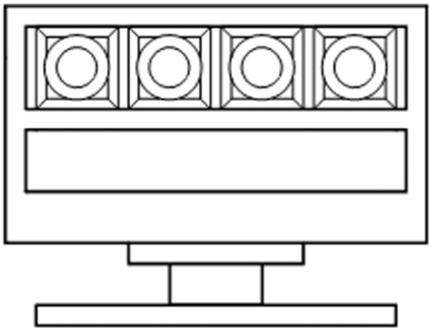
早期的光电跟踪测量仪往往是依靠人一机半自动跟踪,因此在主机上配置有操作员。操作员依靠目视瞄准镜,通过操作手轮(双人操作)或单杆(单人操作)实现半自动跟踪。随着电视跟踪测量传感器、红外跟踪测量传感器以及伺服控制技术新的发展,新研制的光电跟踪测量仪大多为脱机操作,即在主机上不设操作员,而是依靠雷达引导、光电跟踪测量系统间的相互引导、光电跟踪测量系统各种跟踪测量传感器自身强大的捕获和跟踪能力,来实现捕获和跟踪目标。有时根据任务的需要单设若干独立配置的由人操作的引导仪,作为辅助捕获手段,提高捕获成功概率。主机上不设操作员,不但减少了主机的重量和体积,同时简化了跟踪架的复杂程度,机械谐振频率得到提高,由此整个系统的跟踪测量性能得到改善。

用得最多的两种基本配置如图3、图4所示,图3为U型架配置,图4为T型架配置。U型配置的两个水平轴头相离较远,水平轴的基线可以做得较长,因此水平轴和垂直轴的不正交误差和水平轴的晃动可以控制得更严,这对于跟踪和测量高低角非常大(即非常接近天顶)的目标特别有意义。用于靶场光测设备或深空网设备的光电跟踪测量仪首先要求的是高精度测量,因此首先选择U型配置。

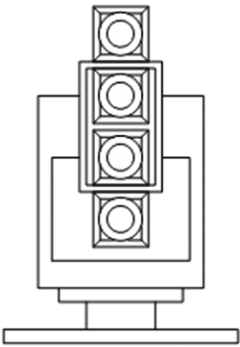
对于火控系统的光电跟踪仪,由于其对测量精度的要求相对来说比较低(比靶场光测设备通常低1~2个数量级),因此往往采用如图4所示的T型配置,用来减轻重量,缩小体积,即减小转动惯量和提高刚度,目的是提高其跟踪角速度和角加速度。

对于本文论述的外视场拼接测量系统,一是

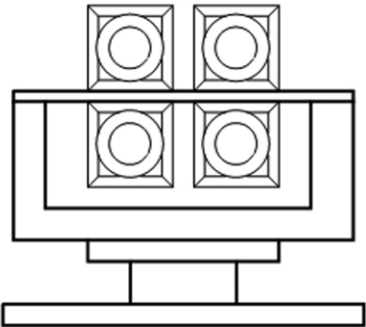
由于在测量过程中,测量装置是静止的,无须进行跟踪;二是布站时视轴基本上处于水平位置,俯仰角较小,因此选用 T 型架配置是合理的。



(a)横“一”结构  
(a) ‘一’ shaped structure



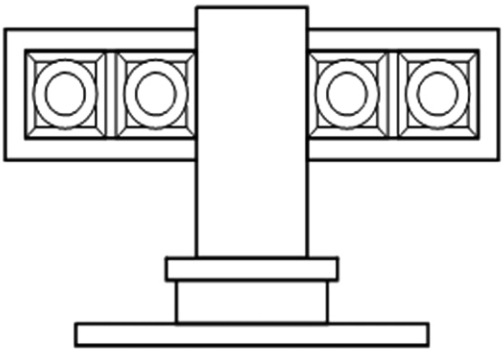
(b)竖“1”结构  
(b) ‘1’ shaped structure



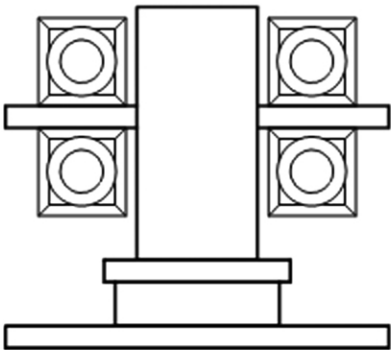
(c)“田”字结构  
(c) ‘田’ shaped structure

图 3 “U”型配置的 3 种方式

Fig. 3 Three methods of ‘U’ type support



(a)“横一”  
(a) ‘一’ shaped structure



(b)“田”字  
(b) ‘田’ shaped structure

图 4 “T”型架配置的两种方式

Fig. 4 Two methods of ‘T’ type support

2. 2. 2 测量相机的外视场拼接方式

由于存在 2 种二轴转台的配置和 4 台测量相机在二轴转台上的布置方式,再加上需要的外视场的“横一”字型、“纵 1”字型和“田”字型 3 种拼接方式,因此有多种多样的组合。但是在选型时不但要考虑测量仪的结构、重量、体积、刚度等多种因素,而且还要考虑如何尽量减小或消除拼接时视差的影响。

虽然“U”型配置可以有如图 3(a)、3(b)和 3(c)3 种配置方式,但是为了视场拼接的方便,图 3(a)的配置只用于外视场为“纵 1”字方式拼接,并且将诸测量相机光学镜头的节点放置在水平轴的轴线上,由此在进行外视场拼接时,不必考虑视差的影响;图 3(b)的配置用于外视场为“横一”字方式拼接,这里将诸测量相机光学镜头的节点放置在过水平轴的同根垂线上,由此在进行外视场拼接时,也可以不必考虑视差的影响;图 3(c)的配

置,无论实现“横一”字、“纵 1”字或“田”字 3 种外视场的拼接都会产生视差,给视场拼接带来误差。

虽然“T”型配置可以有 2 种方式,但是为了视场拼接的方便起见,图 4(a)的配置只用于外视场为“纵 1”字方式拼接,并且将诸测量相机光学镜头的节点放置在水平轴的轴线上,由此在进行外视场拼接时,不必考虑视差的影响。

由于本测量系统的高低角不会太大,每个测量相机单元的质量和体积都不大,采用“T”型配置可以减轻测量设备的质量和体积,增加使用方便性。本论证方案采用如图 4(b)所示“T”型架配置,在“T”型架的两个外伸轴头上,上下、左右对称位置分别放置 4 个测量相机<sup>[10]</sup>。

### 3 外视场拼接的实现

#### 3.1 机械结构

安装 4 台高速摄像机的小型精密机架选用“T”形结构,主要由水平轴系,垂直轴系,方位、俯仰编码器,方位、俯仰微调锁紧机构及调平机构组成,其结构形式为“T”型两轴转台,主要构件均采用铸造铝合金材料。俯仰轴系的转动副选用高精度径向止推轴承,轴系两端为 2 个安装平台,摄像机及镜头通过过渡底板与安装平台连接,以背对背的形式进行装配,其轴向和径向均采用过盈配合。该结构的主要特点是载荷对称布置,刚度好、不变形,稳定性高,体积小、质量轻,便于安装调试。其结构如图 5 所示,测量装置原型机的总体结构如图 6 所示,图 7 为测量装置原型机的电子学框图。

为保证水平轴系晃动精度,结构设计时采用保刚度设计,当刚度满足要求时其强度已远远满足要求,因此对其强度不做分析。经 CAD 工程分析,其挠度变形引起水平轴系晃动均方根误差为 0.59''。

方位轴系采用高精度径向止推轴承,其承载能力及刚度远远大于精密机架头部转动部分载荷的要求,因此“T”型精密机架刚度能够满足使用要求。该精密机架方位、俯仰轴系精度(轴系晃动)均可保证在 3.5''以内。按以上结构设计,测量仪外形尺寸为 570 mm×600 mm×650 mm;质量为 98 kg,其中“T”型两轴精密机架质量 44 kg,高速摄像机质量 3.5 kg×4,镜头质量 5 kg×4,

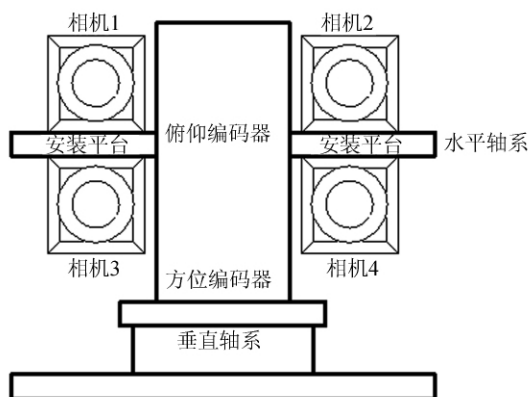


图 5 “T”型架“田”字布置结构图

ig. 5 Layouts of ‘T’ type support and shape ‘田’ structure

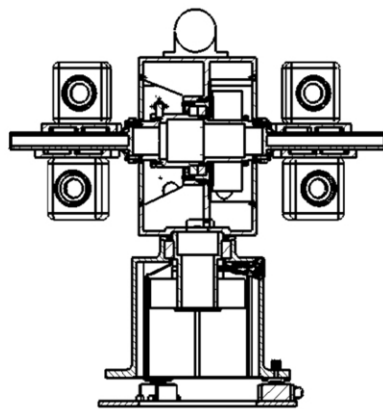


图 6 测量仪结构简图

Fig. 6 Structure figure of measuring instrument

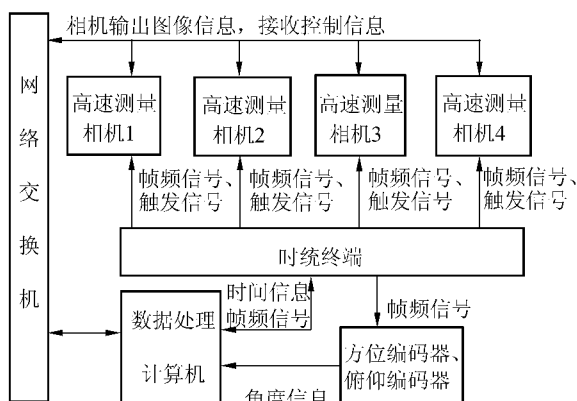


图 7 测量仪电子学各功能块间的方框图

Fig. 7 Frame figure of different electrical function blocks of measuring instrument

辅助连接件质量 7 kg,调平底座质量 13 kg。

#### 3.2 光学镜头设计

为保证光学系统的作用距离不小于 500 m,

光学设计时要充分考虑镜头的焦距和相对孔径。针对  $40^\circ$  的视场要求, 每台高速摄像机装配了一个  $10^\circ$  视场镜头, 该镜头相对孔径为 2.8, 可满足成像能量要求; 为减小体积, 镜头焦距为 94 mm, 口径为 32 mm。这样, 当焦距为 94 mm, 探测器靶面尺寸为 16.4 mm 时, 视场角为  $9.97^\circ$ , 因叠加角度可以在  $5'$  以内, 此镜头可以满足要求。

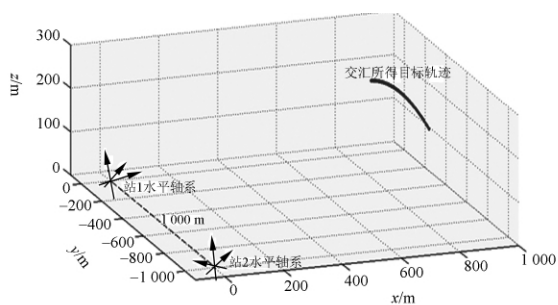
### 3.3 软件实现

采用“田”字型拼接软件模块来完成对同一机架 4 台摄像机的拼接成像, 实现演示播放、数据处理并提供整体成像视频效果。4 台摄像机视场是在水平方向进行拼接, 采用凝视工作模式, 成像时相邻 2 台摄像机的图像有重叠区域, 拍摄物体可能同时位于 2 个视场中。可以以 2 台相邻摄像机的图像重叠区域的同一背景或目标作为拼接依据, 近似合成为一幅图像<sup>[11-12]</sup>。然后对两台摄像机拍摄物体进行轨迹预测, 自动进行目标拼接, 并人工干预保证匹配的正确性。

### 3.4 交汇和视场拼接实例

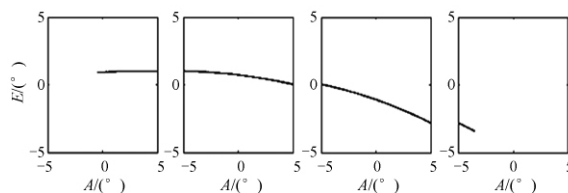
如图 8(a) 所示, 图中以测量站 1 的地理地平坐标系为基准, 分别示出了测量站 1、2 的地理地平坐标系, 以及目标在测量站 1 地理地平坐标系中的三维轨迹, 图中,  $x, y, z$  为测量站地平坐标系。

测量站 1 和 2 的地理地平坐标系的参数为:  $\delta_1 = 125.35^\circ, \theta_1 = 43.88^\circ, h_1 = 6\,371\,000\text{ m}; \delta_2 = 125.362\,5^\circ, \theta_2 = 43.88^\circ, h_2 = 6\,371\,005\text{ m}$ 。图 8(b) 和图 8(c) 分别为在测量站 1 和 2 处的两个高速电视测量仪的 4 台测量相机 C11、C12、C13、



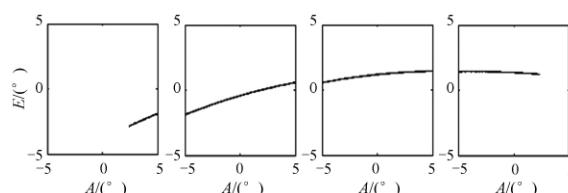
(a) 测量站 1、2 的地理地平坐标系, 以及目标轨迹在测量站 1 地理地平坐标系中的三维图

(a) Geodetic coordinates at measurement station 1 and 2, and 3D pattern of target paths in geodetic coordinates at measurement station 1



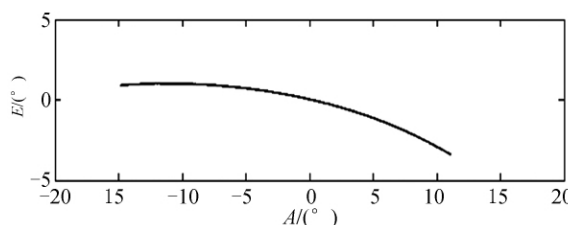
(b) 从左到右分别为运动目标在测量站 1 的 C11、C12、C13、C14 4 个测量相机视场中的轨迹

(b) Target paths in FOV of C11, C12, C13, C14 from left to right at measurement station 1



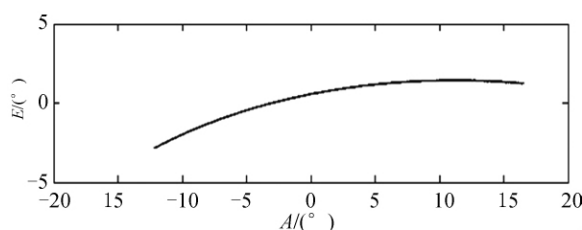
(c) 从左到右分别为运动目标在测量站 2 的 C21、C22、C23、C24 4 个测量相机视场中的轨迹

(c) Target paths in FOV of C21, C22, C23, C24 from left to right at measurement station 2



(d) 运动目标在测量站 1 拼接视场中的轨迹

(d) Target path in FOV after field stitching in measurement station 1



(e) 运动目标在测量站 2 拼接视场中的轨迹

(e) Target path in FOV after field stitching of in measurement station 2

图 8 目标拼接实例

Fig. 8 Example of target stitching

C14 和 C21、C22、C23、C24 对同一飞行目标在各自的视场中的轨迹, 图中,  $E$  和  $A$  分别为目标在各测量站水平轴坐标系中的俯仰角和方位角。

图 8(d)和图 8(e)分别为经过交汇测量和视场拼接后,目标在测量站 1 和 2 处的两个高速电视测量仪的拼接视场中的轨迹。

## 4 结 论

提出了由 4 个测量相机的外视场拼接实现大视场测量的系统方案,设计和研制了外视场拼接测量系统样机。根据要求采用视场角为  $10^\circ \times 10^\circ$  的镜头进行视场拼接,实际拼接后最大视场为

$40^\circ(\text{方位}) \times 10^\circ(\text{高低})$ 。为保证有效覆盖区域内无盲区,相邻上下两摄像系统外边缘视场采用平行叠加的方式拼接,叠加角度控制在  $5'$  以内,机架内侧两摄像系统内边缘视场采用交会叠加的方式拼接。采用  $10^\circ$  视场拼接后,视差为 360 mm 时,目标距摄像机大于 247 m 无盲区,可拍摄到完整的图像;在实际拍摄实验中,目标在 800~1 200 m 可以拍摄到清晰的画面;拍摄 1 000 m 处的物体时,四拼接线视场可以达到  $700 \text{ m} \times 175 \text{ m}$ 。

## 参考文献:

- [1] 张吴. 高速视频中运动目标姿态自动判读方法的研究[D]. 天津:天津大学,2005.  
ZHANG W. *Study on attitude auto interpretation of moving object in high speed video*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [2] 李霞,赵建科. 高速电视姿态测量系统室内目标姿态模拟与标定测量[J]. 光子学报, 2007, 36(7): 1360-1363.  
LI X, ZHAO J K. Pose simulation and calibration of objects in door for high speed TV measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(7): 1360-1363. (in Chinese)
- [3] 谢少荣,周焱,邢兰兴,等. 高速摄像技术在微型旋翼机性能测量中的应用[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(3):378-383.  
XIE SH R, ZHOU Y, XING L X, *et al.*. Application of high-speed camera to characteristic measurement of MAV[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):378-383. (in Chinese)
- [4] 黄进,郭立红,韩晓泉,等. 光电经纬仪高速数字视频采集和存储[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(4):68-71.  
HUANG J, GUO L H, HAN X Q, *et al.*. High speed digital video sampling and storing in optoelectronic theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):68-71. (in Chinese)
- [5] 何昕,魏仲慧,郝志航. 基于单心球面系统的九块面阵 CCD 数字拼接[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(4): 421-424.  
HE X, WEI ZH H, HAO ZH H. Digital camera modeling of butting 9 CCD chips in the concentric spherical lens system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(4):421-424. (in Chinese)
- [6] 李朝辉,王肇勋,武克用. 空间相机 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(3):213-216.  
LI CH H, WANG ZH X, WU K Y. Optical assembly of CCD focal-plane for Space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3):213-216. (in Chinese)
- [7] 任建岳,孙斌,张星祥,等. TDICCD 交错拼接的精度检测[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(10):1852-1857.  
REN J W, SUN B, ZHANG X X, *et al.*. Precision measurement of TDICCD interleaving assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1852-1857. (in Chinese)
- [8] 刘昱,高晓东,曹学东. 大视场光电测量系统实时测量精度的综合标定[J]. 光电工程, 2001, 28(6):10-13.  
LIU G, GAO X D, CAO X D. A Comprehensive calibration of the real-time measurement accuracy for a photoelectrical measuring system with wide field of view [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2001, 28(6):10-13. (in Chinese)
- [9] 兰海滨,王平,龙腾. 图像拼接中相机镜头非线性畸变的校正[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(5):1196-1202.  
LAN H B, WANG P, LONG T. Nonlinear aberration correction of lens in image mosaic[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1196-1202. (in Chinese)
- [10] 王旻,宋立维,乔彦峰,等. 外视场拼接测量系统的视场拼接和交汇测量算法及其实现[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3):229-238.  
WANG M, SONG L W, QIAO Y F, *et al.*. Convergence algorithm of field stitching and intersection measurement for external field stitching measuring system and its implementation[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(3):229-238. (in Chinese)

- [11] 于晓波,盛磊.靶场测量中多镜头大视场视频图像的拼接[J]. 光学 精密工程,2008,16(11):2145-2150.

YU X B, SHENG L. Image stitching of multi-lens with large visual field in range instrumentation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2145-2150. (in Chinese)

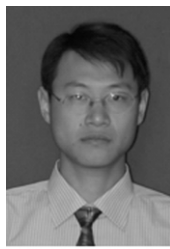
- [12] 韩建栋,吕乃光,王锋,等.采用光学定位跟踪技术的三维数据拼接方法[J]. 光学 精密工程,2009,17(1):45-51.

HAN J D, LV N G, WANG F, *et al.*. 3D data registration method based on optical location tracking technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):45-51. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 旻(1977—),女,吉林长春人,助理研究员,主要从事光电瞄准与测量方面的研究。E-mail: work6180 @ yahoo. com. cn



余 毅(1979—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从事光电测量与控制技术方面的研究。E-mail: yuyi\_ciomp@ yahoo. com. cn



宋立维(1962—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光电测量与控制技术方面的研究。E-mail: ciomp\_slw@163. com

#### 导师简介:



乔彦峰(1962—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电测量与控制技术方面的研究。E-mail: qiaoyf @ ciomp. ac. cn

#### ●下期预告

## 圆形反射镜无隙支撑方法的应用

沙 巍<sup>1,2</sup>,张星祥<sup>1</sup>,陈长征<sup>1</sup>,许艳军<sup>1</sup>,任建岳<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 研究生院,北京 100039)

空间光学遥感器圆形反射镜的安装固定广泛采用间隙配合胶接的边缘支撑方法,在温度变化时,该方法易产生非对称应力从而引起非对称像差(主要表现为像散),影响成像质量,并且在温度恢复后,反射镜面形变化不可逆,因此,本文提出无隙固定方法。该方法依据最小势能原理,使用柔性块以过盈配合的方式固定反射镜。采取线性搜索方法分析得到适当的过盈量(0.03 mm),利用有限元方法模拟实际工况,得到镜面面形变化情况。对反射镜组件进行温度循环试验,并利用干涉仪对反射镜进行检测。试验表明,温度变化 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,镜面面形 RMS 值最大为 0.018 $\lambda$ ,结果符合设计要求(RMS 值 $\leq 0.02\lambda$ );干涉图表明,反射镜受力均匀无像散,在温度循环试验中,反射镜面形变化可逆。对于圆反射镜,采用无隙支撑方法能够很好解决温度变化对镜面面形的不利影响。