

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

王 旻^{1,2}, 宋立维¹, 乔彦峰¹, 余 毅¹

(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:基于2台外视场拼接高速电视测量仪原型样机(硬件)提出了一种将交汇测量和拼接处理相结合的算法。根据需要对地球质心和光电测量系统建立了5个坐标系,介绍了坐标系的定义及其它们之间的变换过程,给出了目标轨迹交汇测量和视场拼接的实例。用2台高速电视测量仪拼接的8台测量相机同时对同一运动目标进行测量,对获得的测量数据进行交汇和视场拼接处理,结果显示提出的拼接算法是正确、有效的,可以得到唯一解;地球曲率半径和地球子午线收敛两项影响因素得到了完全修正,表明交汇测量算法完全可以推广到其它光电测控仪器的交汇测量。

关键词:外视场拼接;交汇测量;地球曲率半径;子午线收敛;误差修正

中图分类号:V557.3; TP391.4 文献标识码:A

Convergence algorithm of field stitching and intersection measurement for external field stitching measuring system and its implementation

WANG Min^{1,2}, SONG Li-wei¹, QIAO Yan-feng¹, YU Yi¹

(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: A convergence algorithm of field stitching and intersection measurement is proposed based on the development of two prototypes of high-speed video-measuring systems with external field stitching. Five coordinates are established for the earth centroid and optoelectronic systems. The definitions of the coordinates are introduced and coordinate transforms are discussed. The experiment of intersection measurement and field stitching for an identical moving target is carried out with the data from eight cameras in two high-speed TV measuring instruments. The result shows that the stitching algorithm is correct and effective, and has obtained an unique solution. Meanwhile, the influences of earth curvature and meridional convergent errors are fully

correlated, which indicates that the intersection measurement algorithm can also be used in the intersection measurement of other optoelectronic measurement and control instruments.

Key words: external field stitching, intersection measurement, earth curvature, meridional convergence; error correction

1 引言

在目标高速测量领域,被测目标速度快、目标多、所占的视场范围大,应用单台的高速摄像机不能拍摄到完整的画面。为了克服单台相机拍摄的不足,研制了一种将4台高速相机拼接为1台高速电视测量仪的方法,实现了对多个目标的完整拍摄。本文基于2台外视场拼接高速电视测量仪原型样机(硬件),提出了一种将交汇测量和拼接处理相结合的算法。用2台高速电视测量仪拼接的8台测量相机同时对同一运动目标进行测量,对获得的测量数据进行交汇和视场拼接处理。结果显示,提出的拼接算法是正确、有效的,可以得到唯一解;地球曲率半径和地球子午线收敛两项影响因素得到了完全修正,表明提出的交汇测量算法,完全可以推广到其它光电测控仪器的交汇测量。

2 外场拼接原理

外视场拼接测量系统,一般由3个测量站光电测量仪组成,首先通过2台以上的光电测量仪测得的数据进行交汇计算,获得每个目标在空间的三维位置信息,然后进行视场拼接^[1,2]。采用外视场拼接,光学系统简单、重量轻、体积小、制造难度低,便于使用,但由于外视场拼接不可避免存在视差,因此进行视场拼接时,计算量大。近代计算机技术的发展,给外视场拼接提供了可能。如图1所示的配置,每个测量站光电测量仪上安装4个测量相机,这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,组成“田”字型布局配置,即为较典型的外视场拼接测量系统。4台摄像机视场在外视场呈水平方向“一”字拼接,且采用凝视工作模式。

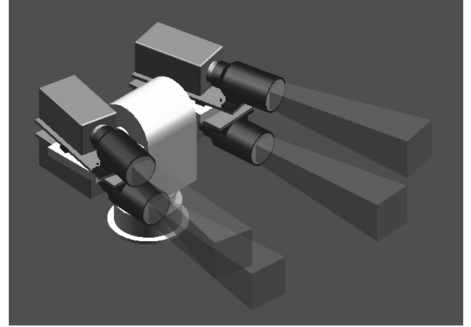


图1 外视场拼接测量系统的外观图

Fig. 1 Outlook of external field butting measuring system

由于各光电测量仪的4个测量相机在上下、左右方向都存在视差,在目标没有距离信息的情况下,只依靠单台光电测量仪的信息不可能完成精密视场拼接,只有应用两台光电测量仪所获得的信息,对同一目标同时进行视场拼接和交汇测量,才能完成精密的视场拼接。

考虑采用“T”字型跟踪架^[3]，“田”字型布局配置的光电测量仪,4个测量相机在上下、左右方向都存在视差,其视场拼接和交汇测量的数学模型具有典型性,本文对这一方案进行了分析,并以一个目标为例,建立了视场拼接和交汇测量的数学模型,在建立数学模型时,考虑了地球曲率半径和子午线收敛误差的影响^[4,5]。

3 坐标系定义

根据实际分析的需要共建立5个坐标系^[6~8](见图2)。各坐标系(右手坐标系)定义如下:

- (1) 地球质心坐标系 $I(i_1, i_2, i_3)$;
- (2) 第 i 个光电测量仪地平坐标系 $S_i(s_{i1}, s_{i2}, s_{i3})$;
- (3) 第 i 个光电测量仪垂直轴坐标系 $V_i(v_{i1}, v_{i2}, v_{i3})$;

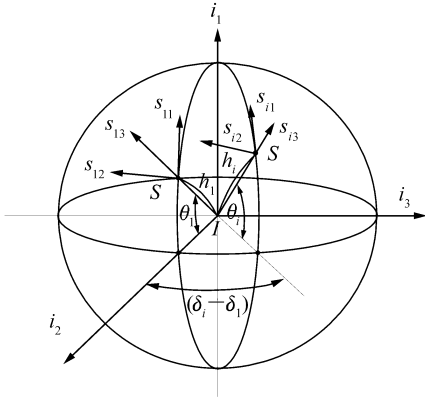


图2 外视场拼接测量系统在地心质心坐标系中的坐标系统示意图

Fig.2 Coordinates of external field stitching measuring system in earth centroid coordinate

- (4)第*i*个光电测量仪水平轴坐标系 $H_i(h_{i1}, h_{i2}, h_{i3})$;
- (5)第*i*个光电测量仪、第*j*个测量相机坐标系 $C_{ij}(c_{ij1}, c_{ij2}, c_{ij3})$ 。

4 测量相机外视场拼接参数 ξ_{ij} 的确定

用文中4个测量相机的配置方式进行外视场拼接时,不可避免地会造成视差。当拼接参数 ξ_{ij} 选择不当时,在一定的测量距离上会产生测量盲区(即漏测),或者浪费测量相机的视场资源。为了实现每台光电测量仪的4个测量相机视场在外场的合理拼接,可以让中间的两个(第二个和第三个)测量相机之间,在 $0.7l_1$ 距离处的外视场紧密拼接(确保不露缝),而在两边的两个(第一个和第二个、第三个和第四个)测量相机之间为紧密搭接(即视场边缘的像元既无重叠又无间隙,条件是第一和第二个,第三和第四个测量相机的节点,上下对齐)。如图3所示。

由图3所示的几何关系可知:

$$d_{i22} = (0.7l_1 - d_{i21}) \tan(\omega_{x12} - \xi_{i2}), \quad (1)$$

$$d_{i32} = (0.7l_1 - d_{i31}) \tan(\omega_{x13} - \xi_{i3}), \quad (2)$$

由此可解得 ξ_{i2} 和 ξ_{i3} , 并进一步解得 ξ_{i1} 和 ξ_{i4} :

$$\xi_{i1} = \xi_{i2} + \omega_{x11} + \omega_{x12}, \quad (3)$$

$$\xi_{i4} = \xi_{i3} + \omega_{x13} + \omega_{x14}, \quad (4)$$

式中 l_1 为被测量目标到光电测量仪地平坐标系原点 S_i 的最近距离; ξ_{ij} 为第*i*个光电测量仪,第*j*

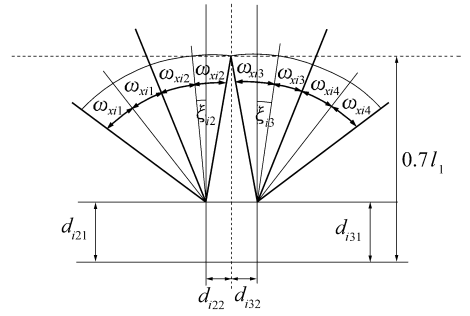


图3 测量相机排列示意图

Fig.3 Sketch of cameras ordering

个测量相机光轴,相对第*i*个光电测量仪水平轴坐标系在方位上的偏转角; d_{ij1} 、 d_{ij2} 、 d_{ij3} 为第*i*个光电测量仪,第*j*个测量相机望远镜头的节点,相对第*i*个光电测量仪水平轴坐标系原点 H_i , 在3个坐标轴上的位移距离; ω_{xij} 、 ω_{yij} 分别为第*i*个光电测量仪,第*j*个测量相机在横向和竖向的半视场角。

为了使各测量相机的各视场之间有一定的覆盖,计算时可将各相机的有效视场角减小一定的量值,用来实现视场的覆盖。

5 从第*i*个光电测量仪,第*j*个测量相机坐标系到第*i*个光电测量仪水平轴坐标系 $H_i(h_{i1}, h_{i2}, h_{i3})$ 的变换

设第*k*个目标到第*i*个光电测量仪,第*j*个测量相机坐标系 C_{ij} 原点的距离为 r_{ijk} , 则该目标在第*i*个光电测量仪,第*j*个测量相机坐标系 C_{ij} 中的测量值 C_{ijk} 为:

$$C_{ijk} = \begin{bmatrix} r_{ijk} \cos \Delta \lambda_{ijk} \cos \Delta \alpha_{ijk} \\ r_{ijk} \cos \Delta \lambda_{ijk} \sin \Delta \alpha_{ijk} \\ r_{ijk} \sin \Delta \lambda_{ijk} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\Delta \alpha_{ijk} = \arctan(x_{ijk}/f'_{ij}), \quad (6)$$

$$\Delta \lambda_{ijk} = \arctan[y_{ijk}/(x_{ijk}^2 + f'^2_{ij})^{1/2}], \quad (7)$$

式中, k 为被测目标的序号; $\Delta \alpha_{ijk}$ 、 $\Delta \lambda_{ijk}$ 分别为第*k*

个目标,在第*i*个光电测量仪,第*j*个测量相机坐标系中的方位角和俯仰角; x_{ijk} 、 y_{ijk} 分别为第*i*个光电测量仪,第*j*个测量相机的面阵 CCD 上,第*k*个目标的横向和竖向脱靶量(mm); f'_{ij} 为第*i*个光电测量仪,第*j*个测量相机镜头的焦距(mm)。

设第*k*个目标到第一个光电测量仪,第*j*个测量相机坐标系 C_{1j} 原点的距离为 r_{1jk} ,则该目标在第一个光电测量仪第*j*个测量相机坐标系 C_{1j} 中的测量值 C_{1jk} 为:

$$C_{1jk} = \begin{bmatrix} r_{1jk} \cos \Delta \lambda_{1jk} \cos \Delta \alpha_{1jk} \\ r_{1jk} \cos \Delta \lambda_{1jk} \sin \Delta \alpha_{1jk} \\ r_{1jk} \sin \Delta \lambda_{1jk} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中, $\Delta \alpha_{1jk} = \arctan(x_{1jk}/f'_{1j})$, (9)

$$\Delta \lambda_{1jk} = \arctan[y_{1jk}/(x_{1jk}^2 + f'_{1j})^{1/2}]. \quad (10)$$

设第*k*个目标经过视场拼接后,在第*i*个光电测量仪水平轴坐标系 H_i (测量相机视场拼接后

的组合测量相机坐标系)中,测量值 H_{ik} 为:

$$H_{ik} = \begin{bmatrix} H_{ik1} \\ H_{ik2} \\ H_{ik3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ik} \cos E_{ik} \cos A_{ik} \\ R_{ik} \cos E_{ik} \sin A_{ik} \\ R_{ik} \sin E_{ik} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 R_{ik} 为第*k*个目标到第*i*个光电测量仪,水平轴坐标系 H_i 原点 H_{oi} 的距离; A_{ik} 、 E_{ik} 分别为第*k*个目标在第*i*个光电测量仪水平轴坐标系中的方位角和俯仰角。

经如下的坐标转换过程:

(1) 绕 c_{ij3} 轴旋转 $(-\xi_{ij})$ 角;

(2) 沿 c_{ij1} 轴平移 $(-d_{ij2})$;

(3) 沿 c_{ij3} 轴平移 $(-d_{ij3})$;

(4) 沿 c_{ij2} 轴平移 $(-d_{ij2})$,

可以实现第*k*个目标,在第*j*个测量相机坐标系 C_{ij} 中的测量值到第*i*个光电测量仪水平轴坐标系 H_i 中测量值的变换。

$$H_{ik} = \begin{bmatrix} H_{ik1} \\ H_{ik2} \\ H_{ik3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ik} \cos E_{ik} \cos A_{ik} \\ R_{ik} \cos E_{ik} \sin A_{ik} \\ R_{ik} \sin E_{ik} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{ij1} \\ 0 & 1 & 0 & d_{ij2} \\ 0 & 0 & 1 & d_{ij3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos(-\xi_{ij}) & \sin(-\xi_{ij}) & 0 & 0 \\ -\sin(-\xi_{ij}) & \cos(-\xi_{ij}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{ijk} \cos \Delta \alpha_{ijk} \cos \Delta \lambda_{ijk} \\ r_{ijk} \cos \Delta \alpha_{ijk} \sin \Delta \lambda_{ijk} \\ r_{ijk} \sin \Delta \alpha_{ijk} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

同理应用下述的坐标转换过程:

(1) 绕 c_{i13} 轴旋转 $(-\xi_{i1})$;

(2) 沿 c_{i11} 轴平移 $(-d_{i11})$;

(3) 沿 c_{i13} 轴平移 $(-d_{i13})$;

(4) 沿 c_{i12} 轴平移 $(-d_{i12})$,

可以实现第*k*个目标,在第一个测量相机坐标系 C_{i1} 中的测量值,到第一个光电测量仪水平轴坐标系 H_1 中的测量值的变换:

$$H_{1k} = \begin{bmatrix} H_{1k1} \\ H_{1k2} \\ H_{1k3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1k} \cos E_{1k} \cos A_{1k} \\ R_{1k} \cos E_{1k} \sin A_{1k} \\ R_{1k} \sin E_{1k} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{j1} \\ 0 & 1 & 0 & d_{j2} \\ 0 & 0 & 1 & d_{j3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos(-\xi_{1j}) & \sin(-\xi_{1j}) & 0 & 0 \\ -\sin(-\xi_{1j}) & \cos(-\xi_{1j}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{1jk} \cos \Delta \alpha_{1jk} \cos \Delta \lambda_{1jk} \\ r_{1jk} \cos \Delta \alpha_{1jk} \sin \Delta \lambda_{1jk} \\ r_{1jk} \sin \Delta \alpha_{1jk} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

6 从第 i 个光电测量仪水平轴坐标系到第一个光电测量仪水平轴坐标系的变换,即 $H_i(h_{i1}, h_{i2}, h_{i3})$ 到 $H_1(h_{11}, h_{12}, h_{13})$ 的变换

经如下的坐标转换过程:

(1)从第 i 个光电测量仪水平轴坐标系 H_i 到第 i 个光电测量仪垂直轴坐标系 V_i 的坐标转换:

①绕 h_{i2} 轴旋转 $-\lambda_i$ 角;

(2)从第 i 个光电测量仪垂直轴坐标系 V_i 到第 i 个光电测量仪地平坐标系 S_i 的坐标转换:②绕 s_{i3} 轴旋转 $-\alpha_i$ 角;

(3)从第 i 个光电测量仪地平坐标系 S_i 到地

球质心坐标系 I 的坐标转换:③沿 s_{i3} 轴平移 $-h_i$;

④绕 s_{i2} 轴旋转 $-\theta_i$ 角;

(4)从地球质心坐标系 I 到第 1 个光电测量仪地平坐标系 S_1 的坐标转换:⑤绕 i_1 轴旋转 $\delta_i - \delta_1$ 角;⑥绕 i_2 轴旋转 θ_1 角;⑦沿 s_{13} 轴平移 h_1 ;

(5)从第 1 个光电测量仪地平坐标系 S_1 到第 1 个光电测量仪垂直轴坐标系 V_1 的坐标转换:⑧绕 s_{13} 轴旋转 α_1 角;

(6)从第 1 个光电测量仪垂直轴坐标系 V_1 地平坐标系 S_1 到第 1 个光电测量仪水平轴坐标系 H_1 的坐标转换:⑨绕 v_{12} 轴旋转 λ_1 角。

可以实现第 k 个目标,在第 i 个光电测量仪水平轴坐标系中的测量值 H_{ik} ,到第一个光电测量仪地平坐标系 H_1 中的测量值 H_{1k} 的变换:

$$\begin{aligned}
 H_{1k} &= \begin{bmatrix} H_{1k1} \\ H_{1k2} \\ H_{1k3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1k} \cos E_{1k} \cos A_{1k} \\ R_{1k} \cos E_{1k} \sin A_{1k} \\ R_{1k} \sin E_{1k} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\lambda_1) & 0 & -\sin(-\lambda_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(-\lambda_1) & 0 & \cos(-\lambda_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
 &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta_i - \delta_1) & \sin(\delta_i - \delta_1) & 0 \\ 0 & -\sin(\delta_i - \delta_1) & \cos(\delta_i - \delta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
 &\begin{bmatrix} \cos(-\theta_i) & 0 & -\sin(-\theta_i) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(-\theta_i) & 0 & \cos(-\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_i) & \sin(-\alpha_i) & 0 & 0 \\ -\sin(-\alpha_i) & \cos(-\alpha_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
 &\begin{bmatrix} \cos\lambda_i & 0 & -\sin\lambda_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\lambda_i & 0 & \cos\lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_{ik1} \\ H_{ik2} \\ H_{ik3} \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{14}
 \end{aligned}$$

式中: δ_i, θ_i, h_i 为第 i 个光电测量仪坐标系原点 S_{oi} 处的赤经、赤纬和相对地球质心的高程(单位 km); α_i 为第 i 个测量站光电测量仪垂直轴坐标系与地平坐标系(正北方向 N)之间的夹角(即真方位角); λ_i 为第 i 个测量站光电测量仪水平轴坐标系相对垂直轴坐标系的俯仰角。

7 交汇测量和视场拼接结果

7.1 交汇测量结果

由于每台光电测量仪的 4 台测量相机之间都存在左右和上下的视差,仅仅应用测量相机的测

量数据不可能完成在自身的光电测量仪中的视场拼接。如式(5)和(8)所示,要完成视场拼接首先应解出距离 r_{ijk} 和 r_{ljk} , 也就是说首先要对 2 台光电测量仪的测量相机的测量数据进行交汇^[9~13], 求

$$\begin{bmatrix} R_{1k} \cos E_{1k} \cos A_{1k} \\ R_{1k} \cos E_{1k} \sin A_{1k} \\ R_{1k} \sin E_{1k} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\lambda_1) & 0 & -\sin(-\lambda_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(-\lambda_1) & 0 & \cos(-\lambda_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta_i - \delta_1) & \sin(\delta_i - \delta_1) & 0 \\ 0 & -\sin(\delta_i - \delta_1) & \cos(\delta_i - \delta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(-\theta_i) & 0 & -\sin(-\theta_i) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(-\theta_i) & 0 & \cos(-\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_i) & \sin(-\alpha_i) & 0 & 0 \\ -\sin(-\alpha_i) & \cos(-\alpha_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\lambda_i & 0 & -\sin\lambda_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\lambda_i & 0 & \cos\lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{ij1} \\ 0 & 1 & 0 & d_{ij2} \\ 0 & 0 & 1 & d_{ij3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(-\xi_{ij}) & \sin(-\xi_{ij}) & 0 & 0 \\ -\sin(-\xi_{ij}) & \cos(-\xi_{ij}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{ijk} \cos\Delta\lambda_{ijk} \cos\Delta\alpha_{ijk} \\ r_{ijk} \cos\Delta\lambda_{ijk} \sin\Delta\alpha_{ijk} \\ r_{ijk} \sin\Delta\lambda_{ijk} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} R_{1k} \cos E_{1k} \cos A_{1k} \\ R_{1k} \cos E_{1k} \sin A_{1k} \\ R_{1k} \sin E_{1k} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{ij1} \\ 0 & 1 & 0 & d_{ij2} \\ 0 & 0 & 1 & d_{ij3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos(-\xi_{1j}) & \sin(-\xi_{1j}) & 0 & 0 \\ -\sin(-\xi_{1j}) & \cos(-\xi_{1j}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{1jk} \cos\Delta\alpha_{1jk} \cos\Delta\lambda_{1jk} \\ r_{1jk} \cos\Delta\alpha_{1jk} \sin\Delta\lambda_{1jk} \\ r_{1jk} \sin\Delta\alpha_{1jk} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

7.2 视场拼接结果

通过解方程(12)可求出 R_{ik} , E_{ik} 和 A_{ik} , 则在第 i 个光电测量仪中, 视场拼接后第 k 个目标在第 i 个光电测量仪水平轴坐标系中(即视场拼接后在组合视场中)的测量值 H_{ik} 为:

$$H_{ik} = \begin{bmatrix} H_{ik1} \\ H_{ik2} \\ H_{ik3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ik} \cos E_{ik} \cos A_{ik} \\ R_{ik} \cos E_{ik} \sin A_{ik} \\ R_{ik} \sin E_{ik} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

得距离信息 r_{ijk} 和 r_{ljk} , 即通过联解方程组(15)、(16)求得 r_{ijk} 和 r_{ljk} 。其中式(15)由式(12)和式(14)联立而得;式(16)即式(13)。

由于:

$$\tan A_{ik} = x_{ik}/f', \quad (18)$$

$$\tan E_{ik} = y_{ik}/(x_{ik}^2 + f'^2)^{1/2}, \quad (19)$$

式中 f' 为测量相机视场拼接后的组合测量相机的标准镜头焦距(mm); x_{ik} , y_{ik} 分别为在第 i 个光电测量仪中, 经视场拼接后, 第 k 个目标在第 i 个光电测量仪组合测量相机视场中的横向和竖向脱靶量(mm)。

由此可得第 k 个目标在第 i 个光电测量仪中, 视场拼接后在组合视场中两个方向上的脱靶

量 x_{ik} 和 y_{ik} 为:

$$x_{ik} = f' \tan A_{ik}, \quad (20)$$

$$y_{ik} = (x_{ik}^2 + f'^2)^{1/2} \tan E_{ik}, \quad (21)$$

通过解(13)可求出 R_{1k} , E_{1k} 和 A_{1k} , 则在第1个光电测量仪中,第 k 个目标在第1个光电测量仪水平坐标系中(即视场拼接后在组合视场中)的测量值 H_{1k} 为:

$$H_{1k} = \begin{bmatrix} H_{1k_1} \\ H_{1k_2} \\ H_{1k_3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1k} \cos E_{1k} \cos A_{1k} \\ R_{1k} \cos E_{1k} \sin A_{1k} \\ R_{1k} \sin E_{1k} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

由于:

$$\tan A_{ik} = x_{ik}/f', \quad (23)$$

$$\tan E_{ik} = y_{ik}/(x_{ik}^2 + f'^2)^{1/2}, \quad (24)$$

可得第 k 个目标在第1个光电测量仪中经视场拼接后在组合视场中两个方向上的脱靶量 x_{1k} 和 y_{1k} 为:

$$x_{1k} = f' \tan A_{ik}, \quad (25)$$

$$y_{1k} = (x_{1k}^2 + f'^2)^{1/2} \tan E_{ik}. \quad (26)$$

8 被测目标轨迹的交汇测量和视场拼接实例

如图4所示,图中以测量站1的地平坐标系

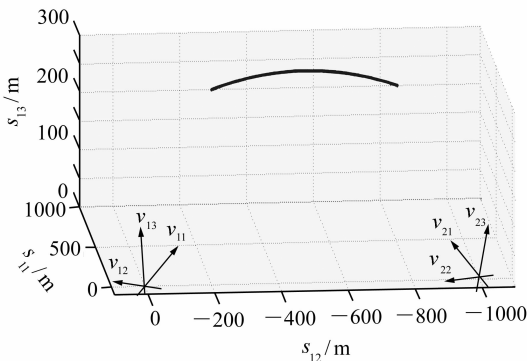


图4 测量站1,2的地平坐标系,以及目标轨迹在测量站1地平坐标系中的三维图

Fig.4 Target path in geodetic coordinates at measurement station 1, and the geodetic coordinates at measurement station 1 and 2

为基准,分别示出了测量站1、2的地平坐标系,以及目标在测量站1地平坐标系中的三维轨迹。

测量站1和2的地平坐标系参数为:

$$\delta_1 = 125.35^\circ, \theta_1 = 43.88^\circ, h_1 = 6\,371\,000 \text{ m};$$

$$\delta_2 = 125.3625^\circ, \theta_2 = 43.88^\circ, h_2 = 6\,371\,005 \text{ m}.$$

测量站1和2的电视测量仪水平坐标系(即组合视场1和2光轴)在各自地平坐标系中的方位和仰角参数为: $\alpha_1 = -35^\circ, \lambda_1 = 15^\circ; \alpha_2 = 30^\circ, \lambda_2 = 15^\circ$ 。

因为拟测目标区域与测量站之间的最短距离为500 m,也就是说大于500 m距离,被测目标可实现无盲区覆盖,本文采用 $l_1 = 500 \text{ m}$ 进行拼接参数设计。

由已知电视测量仪的下列结构参数:

$$d_{111} = d_{121} = d_{131} = d_{141} = 0 \text{ mm};$$

$$d_{211} = d_{221} = d_{231} = d_{241} = 0 \text{ mm};$$

$$d_{112} = d_{122} = d_{212} = d_{222} = 430 \text{ mm};$$

$$d_{132} = d_{142} = d_{232} = d_{242} = -430 \text{ mm};$$

$$d_{113} = d_{143} = d_{213} = d_{243} = 180 \text{ mm};$$

$$d_{123} = d_{133} = d_{223} = d_{233} = -180 \text{ mm};$$

$$f'_{11} = f'_{12} = f'_{13} = f'_{14} = 94 \text{ mm};$$

$$f'_{21} = f'_{22} = f'_{23} = f'_{24} = 94 \text{ mm};$$

$$\omega_{xij} = 4.98^\circ, \omega_{yij} = 4.98^\circ,$$

根据公式(1)、(2)、(3)、(4),得出电视测量仪1和2的其它结构参数为:

$$\xi_{12} = \xi_{22} = 4.9096^\circ;$$

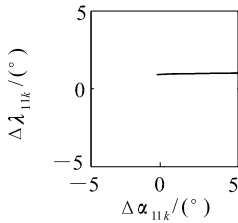
$$\xi_{11} = \xi_{21} = 14.8696^\circ;$$

$$\xi_{13} = \xi_{23} = -4.9096^\circ;$$

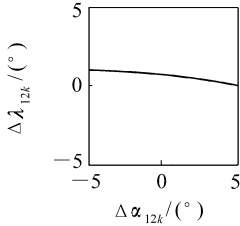
$$\xi_{14} = \xi_{24} = -14.8696^\circ.$$

图5和图6分别为在测量站1和2处的两个高速电视测量仪的8台测量相机 $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}$ 和 $C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}$, 用500 frame/s的采样频率,对同一运动目标在视场中获得的测量值,总测量时间为2 s,总采样数据为1 000组。

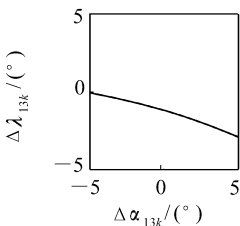
图7和图8分别为根据测量站1和2的2个高速电视量仪的8台测量相机对在视场中获得的同一运动目标测量值进行交汇测量处理和视场拼接后在电视测量仪中拼接视场中的拼接结果(轨迹)。



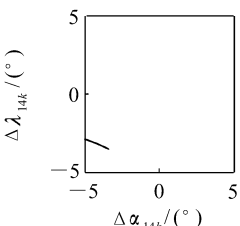
(a) 第1台测量相机视场中的轨迹
(a) Target path in FOV of the first measuring camera



(b) 第2台测量相机视场中的轨迹
(b) Target path in FOV of the second measuring camera



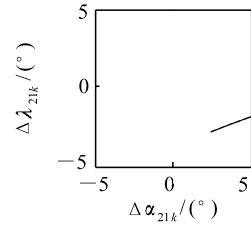
(c) 第3台测量相机视场中的轨迹
(c) Target path in FOV of the third measuring camera



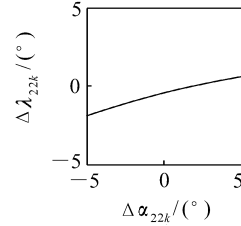
(d) 第4台测量相机视场中的轨迹
(d) Target path in FOV of the fourth measuring camera

图5 运动目标在测量站1中C1₁、C1₂、C1₃、C1₄4个测量相机视场中的轨迹

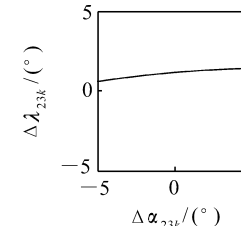
Fig.5 Target paths in FOV of C1₁, C1₂, C1₃, C1₄ 4 measurement station 1



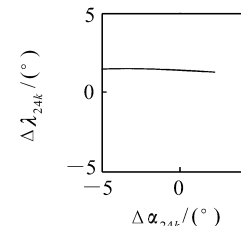
(a) 第1台测量相机视场中的轨迹
(a) Target path in FOV of the first measuring camera



(b) 第2台测量相机视场中的轨迹
(b) Target path in FOV of the second measuring camera



(c) 第3台测量相机视场中的轨迹
(c) Target path in FOV of the third measuring camera



(d) 第4台测量相机视场中的轨迹
(d) Target path in FOV of the fourth measuring camera

图6 运动目标在测量站2中C1₁、C1₂、C1₃、C1₄4个测量相机视场中的轨迹

Fig.6 Target paths in FOV of C1₁, C1₂, C1₃, C1₄ at measurement station 2

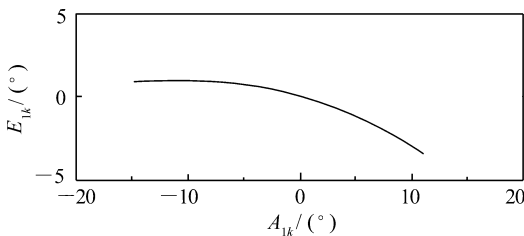


图7 运动目标在测量站1拼接视场中的轨迹
Fig.7 Target path in FOV after field stitching of measurement station 1

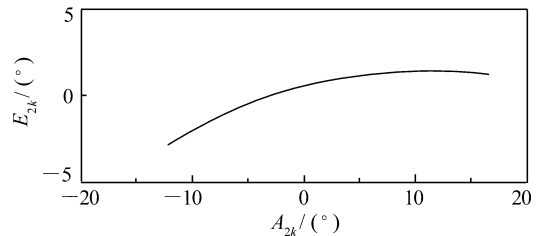


图8 运动目标在测量站2拼接视场中的轨迹
Fig.8 Target path in FOV after field stitching of measurement station 2

9 结 论

能否实现高速电视测量仪外视场拼接,取决于硬件和拼接算法(软件)两个方面。本文在2台高速电视测量仪原型样机(硬件)研制成功的基础上,提出了一种将交汇测量和拼接处理相结合的算法,通过用2台高速电视测量仪的8台测量相机测量同一运动目标,并对获得的测量数据进行交汇和视场拼接处理,得出以下结论:

- (1) 拼接算法是正确、有效的,可以得到唯一解。
- (2) 要完成视场拼接,首先要根据交汇测量原理,对数据进行交汇测量处理^[9~13],解出目标的距离信息。
- (3) 本文中提供的交汇测量拼接算法,由于引入地球质心坐标系变换,地球曲率半径和地球子午线收敛角两项影响因素得到了完全修正(当两站测量仪在同一纬度上时,两个站点之间

的地球子午线收敛角最大,设两个站点测量仪在纬度为 43.88° ,相距1 km时,其地球子午线收敛角约为 $45''$,两站地平面铅垂线之间的夹角约为 $32.5''$)。(4)本文中的交汇测量算法,完全可以推广到其它光电测控仪器的交汇测量,如果拟测量的目标越远,或测量站间布站距离越大,则这种算法的效果和优点就更明显。(5)视场拼接和交汇测量的总误差,主要来自两个方面:一是光电测量仪本身的测量误差;二是布站点处地平坐标系原点位置的测量误差。外视场拼接和交汇测量算法本身不引入误差。

需要注意的是,布站时任意2台光电测量仪到被测目标区域之间的夹角不要过小,最好符合正交布站原则,否则由于光电测量仪本身的测量误差和布站点位置测量误差的影响,会导致交汇测量误差增大,甚至造成交汇无解。

参考文献:

- [1] 刘旻,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]. *Opto-electronic Eng.*,2001,28(6):10-13. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 贾峰,李桂芝,南雪飞.靶场T型架光电经纬仪精度检测方法的研究与应用[J].飞行器测控学报,2007,26(2):24-29.
JIA F,LI G ZH,NAN X F. An accuracy test method for type-T cinetheodolites in instrumentation ranges[J]. *J. Spacecraft TT&C Technol.*,2007,26(2):24-29. (in Chinese)
- [4] 何照才,胡保安.光学测量系统[M].北京:国防工业出版社,2002.
HE ZH C,HU B A. *Optical Measure Systems*[M]. Beijing:National Defence Industry Press,2002. (in Chinese)
- [5] 赵学颜,李迎春.靶场光学测量[M].北京:国防工业出版社,2001.
ZHAO X Y,LI Y CH. *Optical Measure at Shooting Range*[M]. Beijing:National Defense Press,2001. (in Chinese)
- [6] 王家骥.光学仪器总体设计[M].长春:中科院长春光学精密机械与物理研究所,2003.
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design*[M]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,2003. (in Chinese)
- [7] 金光,王家骥.利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J].光学精密工程,1999,7(5):89-94.
JIN G,WANG J Q. The three-error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation[J]. *Opt. Precision Eng.*,1999,7(5):89-94. (in Chinese)
- [8] 王家骥,金光,颜昌翔.机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J].光学精密工程,2005,13(2):105-116.
WANG J Q,JIN G,YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. *Opt. Precision Eng.*,2005,13(2):105-116. (in Chinese)
- [9] 冯桂兰,田维坚,屈有山,等.实时视场拼接系统的设计与实现[J].光电工程,2007,34(4):124-127.
FENG G L,TIAN W J,QU Y SH, et al.. Design of real-time video mosaic system[J]. *Opto-electronic Eng.*,2007,34

- (4):124-127. (in Chinese)
- [10] 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 Y, SUN B, ZHANG X X, *et al.*. Precision measurement of TDICCD interleaving assembly[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1852-1857. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 李喆,丁振良,袁峰. 基于共面点的多视觉测量系统的全局标定[J]. 光学精密工程,2008,16(3):467-472.
LI ZH, DING ZH L, YUAN F. Global calibration method for multi-vision measurement system with coplanar targets[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):467-472. (in Chinese)
- [13] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing*[M]. Beijing:China Machine Press,2007. (in Chinese)

作者简介:王 旻(1977—),女,吉林长春人,硕士研究生,主要从事光电瞄准与测量的研究。

E-mail:work6180@yahoo.com.cn

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