

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006017

遥感卫星外壳摄影测量网络定向方法研究^{*}

韩首榜,董明利,孙 鹏,燕必希,王 君

(北京信息科技大学 光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192)

摘 要:由于大型遥感卫星外壳具有多面体结构,产生了相邻面之间的照片采集重叠率低以及定向靶标局部可见等现象,最终导致摄影测量网络定向完整度低,测量精度降低。为此,提出一种针对大型立体结构的摄影测量网络定向方法。首先在五点法基础上利用局部图像对上的同名编码点解算图像对之间的相对外方位参数,然后以公共点数量和反投影误差最小作为依据,建立图像全局相对定向链路并扩展图片定向网络,从而实现多面体结构摄影测量图像网络的全局相对定向。使用所提方法对 $3.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}\times 2.2\text{ m}$ 的某遥感卫星壳体进行摄影测量,结果表明,所提方法的定向完整度和精度优于传统定向算法。所提方法能够为多面体航天器构件的摄影测量提供准确可靠的图片外方位参数初值,定向角度标准差小于 $0.000\ 3\text{ rad}$,平移量标准差小于 0.7 mm 。

关键词:摄影测量;相对定向;五点法;测量网络;定向链路;遥感卫星外壳

中图分类号: TH721 TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.20

Photogrammetric network orientation of remote sensing satellite outer surface

Han Shoufang, Dong Mingli, Sun Peng, Yan Bixi, Wang Jun

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument,
Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The outer surface of large remote sensing satellites consists of polyhedral structure. The overlap rate between images of adjacent surfaces are very low and the orientation target is visible in just a few images. As a result, it is difficult to orient the whole photogrammetric image network. The measurement accuracy of such structure is low. A photogrammetric network orientation method for large three-dimensional (3D) structures is proposed. The relative exterior orientation parameters between images are solved by the 5-point method using several coded targets. Then, a relative orientation link is built and extended to involve all the images by maximizing the number of coded targets. In this way, the back-projection error is minimized, and the global relative orientation of the photogrammetric image network of large 3D structures is realized. The method is applied to photogrammetric measurement of the out surface of a $3.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}\times 2.2\text{ m}$ remote sensing satellite. Results show that the orientation completion and accuracy of the method are better than those of the traditional methods. The method provides accurate and reliable initial estimation of exterior parameters for the photogrammetric images of large spacecraft components with 3D structures. The standard deviation of exterior angle parameters is smaller than $0.000\ 3\text{ rad}$, and the standard deviation of translation parameters is smaller than 0.7 mm .

Keywords: photogrammetry; relative orientation; five-point method; measurement network; orientation link; remote sensing satellite outer surface

0 引 言

遥感卫星在轨运行时,温度变化引起的热变形会改

变遥感相机的内外方位参数,进而影响其工作性能。因此在卫星升空入轨之前,必须在地面模拟环境中研究变形量与温度变化之间的关系^[1]。遥感卫星外壳结构尺寸大、呈多面体结构,热致变形分析需要的测量点多。常用

的坐标或变形测量系统有激光跟踪仪、室内定位系统(indoor global positioning system, iGPS)、激光雷达、光纤传感测量系统等。激光跟踪仪测量范围广而且精度高,10 m内精度可达 $\pm 15 \mu\text{m}$,但属于逐点测量方式,在测点较多时测量效率低,且由于遥感卫星外壳的多面体特点,需要转站测量,会导致测量精度和效率降低。激光雷达精度在5 m内优于 $60 \mu\text{m}$,但同样需要转站测量。iGPS测量系统理论精度为0.25 mm且依赖基站数量,不满足遥感卫星外壳 $50 \mu\text{m}$ 的测量精度需求,而且更多的基站数量会带来成本增加的问题^[2]。光纤应变传感器测量变形精度较高,但需逐点埋设,在测点较多时测量效率低,且测量时需要信号发生及解调设备,增加了测量成本^[3]。因此以上传统的坐标或变形测量系统无法满足遥感卫星外壳的热致变形测量需求。

摄影测量具有范围大、多点同时测量、非接触、精度高等特点^[4],是航天零部件几何尺寸和变形测量的有效手段^[5],国内外学者将摄影测量技术广泛应用于航天零部件测量。Ozawa等^[6]采用摄影测量对天线的热变形进行了测量。Whitman等^[7]利用摄影测量辅助James Webb空间望远镜对准实验。Zhang等^[8]采用摄影测量技术对射电望远镜的抛物面型反射器进行测量。以上摄影测量使用普通数码单反相机作为影像传感器,测量范围可达10 m以上,相对测量精度可达1/150 000,但测量目标物均为天线、反射镜等类表面物体,不属于多面立体结构。

由于遥感卫星外壳体积大、具有立体结构,需要采用分区域、立体的测量网络覆盖所有被测表面,这类复杂测量图像网络的定向是难点。传统方法使用精密加工的靶标进行相机定向,利用靶标点的空间坐标和其对应的像面点坐标,求解相机拍摄时的外方位参数^[9]。因在实际拍照中存在大量定向靶盲区,可靠、精确地定向无靶标图片是实现完整摄影测量的关键。为实现大型三维物体摄影测量的全局定向,现有研究主要有:1)通过其他高精度仪器测得控制点坐标,从而建立全局精密坐标控制网实现三维数据融合。崔晓川等^[10]将被测物体分割成若干区域分别成像,利用全局控制点将各局部形貌信息拼接至全局坐标系下,实现整体测量。马彤彤^[11]采用激光跟踪仪对控制点进行测量,以此作为控制网辅助航空部件的摄影测量。2)分区域测量和数据拼接。史传飞^[12]将直升机分为前后两段,分别用相机测量两段的三维数据,最后通过交界处的编码点实现两组数据的拼接。3)立体标志物定向方法。Mendikute等^[13]使用立体编码点实现大型三维零件表面的摄影测量。刘桂华^[14]在拍摄场景布置多个十字靶标来增加场景中的控制点约束,对大型零件进行摄影测量。李云雷等^[15]设计了立体定向靶标确定相机外方位参数。梁静等^[16]通过五面体编码点实现加速器隧道的摄影测量。

以上方法对测量空间需求大、需要高精度测量仪器辅助或特殊的定向靶标,同样存在可视盲区和误差累计的现象,降低了大型多面体结构摄影测量结果的完整性和精度。本文提出了一种针对遥感卫星外壳结构摄影测量的链路扩展定向方法,该方法不需要建立控制点,对空间尺寸没有依赖,不需要额外设计构件,能够有效解决遥感卫星外壳的测量网络定向问题,有效提高测量精度。

1 基于五点法的链路扩展定向方法

针对复杂立体摄影测量图像网络的定向难题,本文提出利用五点法建立相邻图像之间的局部网络,并求解最佳比例缩放和刚性变换矩阵实现局部网络的全局拼接,克服了对于全局控制点的要求;以像面误差最小为目标,求解复杂图像网络定向的最优定向链路,通过相对定向和全局拼接迭代的方式逐步扩展全局定向网络,最终实现摄影测量图像的准确可靠定向。

1.1 图像对之间的相对定向

相对定向是指仅利用同名点对的像面坐标数据,求解图像对之间相对外方位参数的方法,依靠的是本质矩阵的求解和分解^[17]。本质矩阵 $\mathbf{E}$ 包含了外方位参数中的所有信息, $\mathbf{E}$ 满足公式^[9]:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{E} \mathbf{X} = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}$, $\mathbf{X}' = \mathbf{K}'^{-1} \mathbf{x}'$, $\mathbf{K}$ 为摄像机的内参数矩阵, $\mathbf{x}$, $\mathbf{x}'$ 分别表示左右两图中对应像点齐次坐标。

本文通过计算机视觉中的五点法^[18-19]对图像对进行相对定向,能够克服平面场景的退化问题,又在最大程度上减少定向所需的公共点数量。首先利用图像对的5组对应点坐标建立本质矩阵的方程组,然后通过线性方法求解本质矩阵的基础解系 $\{\mathbf{E}_w, \mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y, \mathbf{E}_z\}$,则本质矩阵 $\mathbf{E}$ 是基础解系的某种线性组合:

$$\mathbf{E} = w\mathbf{E}_w + x\mathbf{E}_x + y\mathbf{E}_y + z\mathbf{E}_z \quad (2)$$

本质矩阵具有如下特性:

$$\begin{cases} |\mathbf{E}| = 0 \\ 2\mathbf{E}\mathbf{E}^T \mathbf{E} - \text{tr}(\mathbf{E}\mathbf{E}^T) \mathbf{E} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $|\cdot|$ 表示矩阵的行列式; $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。将式(2)代入式(3)中,即可获得关于未知数 w, x, y 的十次多项式方程组,进一步通过隐藏变量方法可以解得对应的 w, x, y ^[20]。

求解本质矩阵 $\mathbf{E}$ 后,再对其进行奇异值分解(singular value decomposition, SVD):

$$\mathbf{E} = \mathbf{U}_E \mathbf{S}_E \mathbf{V}_E^T \quad (4)$$

则旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移矢量 $\mathbf{t}$ 的可能解为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_E \mathbf{W} \mathbf{V}_E^T \text{ 或 } \mathbf{R} = \mathbf{U}_E \mathbf{W}^T \mathbf{V}_E^T \quad (5)$$

$$\mathbf{t} = L \mathbf{U}_E \mathbf{Z} \mathbf{U}_E^T \text{ 或 } \mathbf{t} = L \mathbf{U}_E \mathbf{Z}^T \mathbf{U}_E^T \quad (6)$$

式中: L 为不等于0的任意常数,表示缩放因子。 $\mathbf{W}$ 和 $\mathbf{Z}$

分别为:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由式(5)和(6)可知, $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{t}$ 共有 4 组可能解的组合, 需要对外方位参数进行筛选。每组外方位参数均可以重建空间三维点 X_i 并得到它们的反投影残差之和:

$$Err = \sum_{i=1}^N \{ |\eta_{i1} \mathbf{P}_{i1} \mathbf{X}_i - \mathbf{x}_{i1}| + |\eta_{i2} \mathbf{P}_{i2} \mathbf{X}_i - \mathbf{x}_{i2}| \} \quad (7)$$

式中: $|\cdot|$ 表示向量的模。选取所有可能解中反投影残差之和最小的作为局部相对外方位参数的最优解^[18]。

1.2 局部定向网络的拼接

通过相对定向得到的旋转和平移矩阵表述的只是图像对之间的局部相对方位, 且得到的平移矩阵缺少比例因子^[21], 需要通过缩放和刚性变换拼接至由定向靶建立的全局坐标系中^[22]。如图 1 所示, 连线相机站位为拍摄到定向靶标的图像集合。

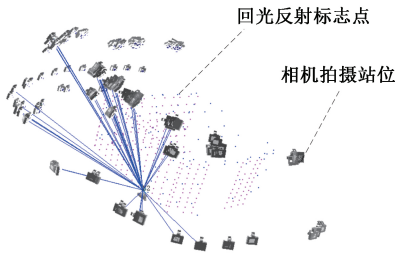


图 1 拍摄到定向靶相机站位集合

Fig.1 The camera stations capturing the orientation target bar

利用局部相对网络和全局网络中公共编码点之间距离的比值, 求解网络拼接中的缩放因子, 计算公式如下:

$$L = \frac{2 \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N \frac{D_{mn}}{d_{mn}}}{(N-1)N} \quad (8)$$

式中: D_{mn} 、 d_{mn} 分别为全局坐标系下和局部相对坐标系下, 公共编码点 m 与 n 之间的距离。

定义左图像 i 在全局坐标系中的外方位参数 $\mathbf{R}_i$ 和 $\mathbf{T}_i$ 为已知, 右图像 j 相对于 i 的旋转和平移矩阵分别为 $\mathbf{R}_{ij}$ 和 $\mathbf{T}_{ij}$, 那么相同空间点的坐标在不同坐标系中的传递关系为:

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{R}_i (\mathbf{X}_w - \mathbf{T}_i) \quad (9)$$

$$\mathbf{X}_j = \mathbf{R}_{ij} \mathbf{X}_i + L \mathbf{T}_{ij} \quad (10)$$

式中: L 为比例因子; $\mathbf{X}_i$ 、 $\mathbf{X}_j$ 、 $\mathbf{X}_w$ 分别为空间点在左图像、右图像和世界坐标系中的坐标, 于是可以得到空间点在局部和全局网络中的坐标转换关系:

$$\mathbf{X}_j = \mathbf{R}_{ij} \mathbf{R}_i [\mathbf{X}_w - (\mathbf{T}_i - L \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{R}_{ij}^{-1} \mathbf{T}_{ij})] \quad (11)$$

其中 $\mathbf{R}_j = \mathbf{R}_{ij} \mathbf{R}_i$, $\mathbf{T}_j = \mathbf{T}_i - L \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{R}_{ij}^{-1} \mathbf{T}_{ij}$ 即为局部定向网络向全局网络拼合的刚性变换矩阵。

1.3 全局定向链路扩展

由于遥感卫星外壳是具有多个面的复杂空间立体结构, 为保证测量结果的完整性, 按照如图 2 所示的立体网络站位拍摄图像。在保证视场能够覆盖被测壳体的前提下, 又能通过公共点增加相邻图像之间的关联性, 从而保证整个摄影测量网络的稳定性和可靠性。

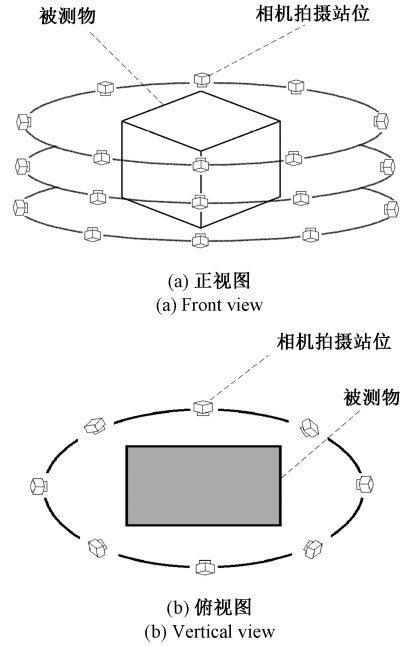
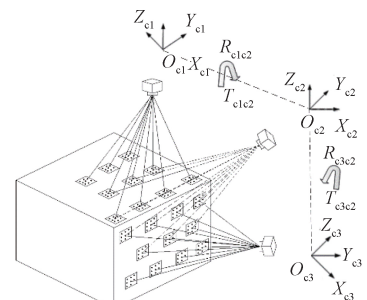


图 2 摄影测量网络

Fig.2 The photogrammetric image network

可见, 测量网络中不同站位的拍摄方位和拍摄范围具有极大差异, 绝大部分图像缺乏同全局坐标系之间的直接关联, 同时每张图像又与若干图像存在关联性。因此, 需要在未知任何图像外方位信息的条件下, 仅通过对图像目标点进行分析, 建立最佳定向链路, 按照最优定向顺序不断扩展全局网络, 最终实现大量局部相对网络的全局拼接。如图 3 所示, 通过绝对外方位参数已知的相机位置 C_1 与局部相对网络 $C_1 C_2$ 之间、 $C_2 C_3$ 之间的相对外方位参数, 可以得到相机位置 C_3 的绝对外方位参数, 即该链路实现相机 C_1 至 C_3 的外方位参数转换。



(a) 局部定向链路
(a) Locally oriented link

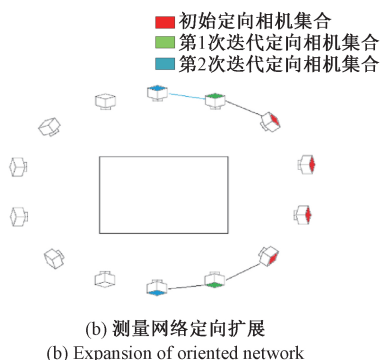


Fig.3 Schematic diagram of oriented network expansion

全局网络定向流程如图 4 所示,定向步骤如下:

- 1) 图片预处理得到编码点的像面坐标;
- 2) 使用绝对定向方法计算拍摄到定向靶图片的外方位参数,并归类为已定向图片集;
- 3) 利用已定向图片集重建编码点空间坐标;
- 4) 选取满足约束条件的已定向和未定向图片对,求解局部相对外方位参数,进一步利用 1.2 节方法将其拼接至全局网络;
- 5) 每张图像均存在若干不同链路与全局网络关联,通过像面误差评价链路优劣,选择误差最小的链路进行拼接;
- 6) 重复步骤 3)~5),直至全部图片定向完成。

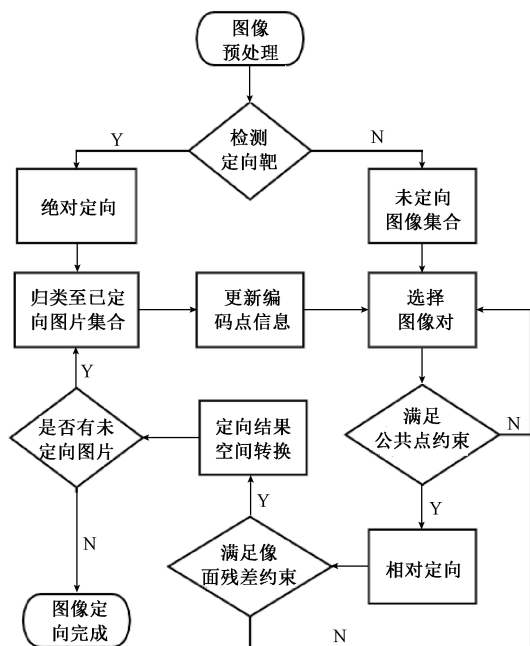


图 4 定向方法流程

Fig.4 Flow chart of the orientation method

2 实验及结果

为验证方法的精度和可靠性,将定向方法应用于 $3.5\text{ m} \times 3.5\text{ m} \times 2.2\text{ m}$ 某遥感卫星外壳热致变形测量。使用 Nikon D3400 数字单反相机拍摄摄影测量图像,传感器大小为 $23.5\text{ mm} \times 15.6\text{ mm}$,像素尺寸为 $3.9\text{ }\mu\text{m} \times 3.9\text{ }\mu\text{m}$,摄影测量系统组成如图 5 所示,摄影测量关键参数如表 1 所示。



图 5 摄影测量系统硬件组成

Fig.5 Composition of the photogrammetric system

表 1 摄影测量关键参数表

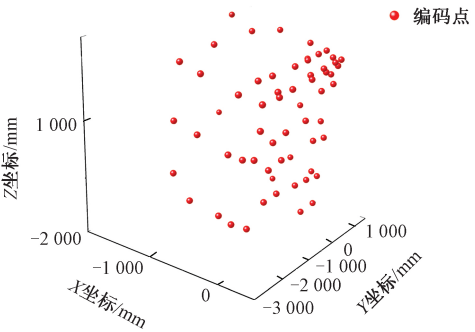
Table 1 Key parameters of photogrammetry

参数	数值
相机型号	NIKON D3400
相机分辨率/pixel	6 000×4 000
相机焦距/mm	18.355
水平视场角/rad	1.139
垂直视场角/rad	0.804
局部区域拍摄距离/m	1.7±0.5

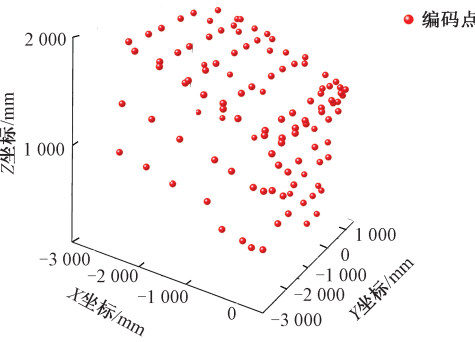
在被测表面粘贴 96 个回光反射编码点及 518 个回光反射目标点,并放置定向靶,按照图 2 所示测量网络共拍摄 205 张图像。

分别采用传统定向算法与本文提出的方法进行对比,以定向靶建立坐标系,图 6(a)所示为传统绝对定向算法的编码点重建结果,图 6(b)所示为采用本文算法得到的编码点三维重建结果。

绝对定向方法只能够定向 28 张图像,仅能重建含有定向靶一侧的 61 个编码点。而本文方法能够定向 197 张照片,最终可以重建被测物表面的 96 个编码点,得到完整的图像网络和编码点信息,为最后的光束平差提供外方位参数初值。两种方法重建结果对比如表 2 所示。



(a) 绝对定向方法三维重建结果
(a) The 3D reconstruction results of absolute orientation



(b) 本文方法的三维重建结果
(b) The 3D reconstruction results of the proposed method

图 6 两种方法的编码点三维重建结果对比
Fig.6 Comparison of 3D reconstruction results

表 2 两种方法重建结果对比表

Table 2 Comparison of 3D reconstruction results			
方法名称	定向图片数	重建编码点数	完整度%
传统绝对定向	28	61	63.5
本方法	197	96	100

将图像网络的外方位参数初值代入光束平差过程,进一步解算相机内方位参数、图像外方位参数及目标点空间坐标。以光束平差的外方位参数作为理论真值,本方法外方位参数的平移误差与角度误差如表 3 所示。

表 3 本文方法的平移误差与角度误差统计表

Table 3 Translation and angle errors of the proposed method						
外参数	平移向量误差/mm			旋转角度误差/mrad		
	Δx	Δy	Δz	$\Delta \alpha$	$\Delta \beta$	$\Delta \gamma$
平均	2.723	0.124	-1.132	0.8	1.3	0.1
最大	42.696	37.848	43.835	21.8	24.3	12.8
最小	0.066	0.007	0.038	0.1	0.1	0.1
标准差	0.662	0.530	0.520	0.3	0.2	0.2

197 张图片外方位参数中平移量误差的标准差小于 0.7 mm,角度量误差的标准差小于 0.3 mrad。利用定向结果,对普通目标点进行匹配和光束平差计算,得到所有空间点坐标的均方根值统计结果如表 4 所示。

表 4 光束平差空间点坐标均方根值统计结果
Table 4 RMS of coordinates after bundle adjustment

坐标均方根值	μm		
	X 轴	Y 轴	Z 轴
平均值	26	24	22
最大值	115	85	67
标准差	15	15	10

光束平差后,被测目标点、编码点和相机站位的空间结构如图 7 所示。

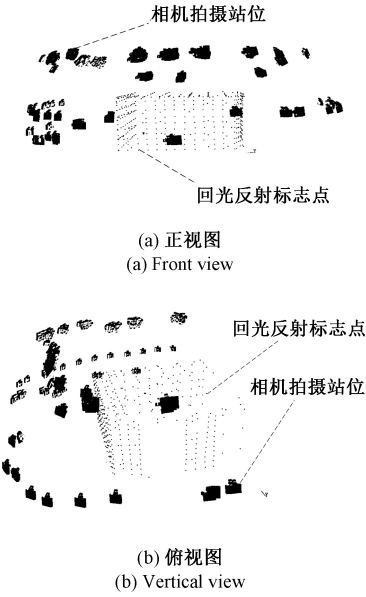


图 7 光束平差计算后得到的空间点和相机站位
Fig.7 The space points and camera stations obtained after bundle adjustment

同时为验证本方法,使用传统的控制网辅助测量法以及分区域测量法对遥感卫星外壳进行测量,对 3 种方法的测量设备、转站或拼接次数、测量时间和测量精度进行比较。采用控制网辅助测量法对遥感卫星外壳进行测量时,首先使用全站仪测量编码点的空间坐标作为控制网,然后利用控制网对每张图像进行绝对定向,最后通过光束平差获得普通测点的高精度坐标。由于全站仪无法测量看不到的目标,因此需要多次转站完成外壳表面所有编码点的测量。采用分区域测量方法对遥感卫星外壳进行测量时,首先按照不同测量面将遥感卫星外壳分为 5 个局部测量区域,接着依次在每个区域放置定向靶并

测量当前表面的目标点坐标,最后利用相邻表面的公共编码点求解坐标系转换参数,将不同测量区域的数据拼合。几种方法的实验数据对比如表 5 所示。

表 5 3 种方法测量结果对比

Table 5 Measurement results comparison of three methods

方法	测量设备	转站或拼接	测量时 间/min	测量精 度/ μm
链路扩展 定向方法	摄影 测量系统	不需要	8	24
控制网 辅助测量	摄影测量 系统、全站仪	全站仪 转站 5 次	60	23
分区域 测量	摄影 测量系统	区域测量 5 次, 数据拼接 1 次	30	85

可见,由于不需要转站或拼接,本文方法 8 min 就能完成整体测量,同时空间坐标测量精度达到 24 μm 。控制网辅助测量法精度达到了 23 μm ,但是由于全站仪需要多次转站以建立完整控制网,测量过程耗时 60 min。分区域测量法需要将每个面的独立测量结果进行拼接,由于存在拼接误差累积现象,测量精度只有 85 μm ,无法满足测量精度要求,而且测量过程耗时 30 min。

3 结 论

为了实现大型航天器结构热致变形的摄影测量,本文提出一种基于五点法的链路扩张定向方法。本文方法通过绝对定向算法解算能够拍摄到定向靶图片的外方位参数,然后利用五点法求解已定向与未定向图片之间的相对外方位关系,建立外方位参数转换链,进而通过像面误差评价图片对的相对定向结果,逐步增加定向图片、扩展定向链路,实现全局定向。实验证明,本文提出的相对定向方法对相邻面拍摄重叠度低、定向靶局部可见的测量任务是一种很好的解决方案,能够完成测量图像网络的全局定向且定向精度高,使摄影测量可以更好地应用于大尺寸、复杂结构件的测量任务,对提高测量精度和稳定性具有重要意义。

参考文献

[1] 马开锋. 高低温环境卫星天线形面变形的近景摄影测量与数据处理[D]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
MA K F. Close-range photogrammetry and data processing

of shape-surface deformation of satellite antenna under high-low temperature environments[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016.

[2] 刘丽, 马国庆, 高艺, 等. 基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌机器人柔性测量技术[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 200-205.

LIU L, MA G Q, GAO Y, et al. Flexible measurement technology of complex curved surface three-dimensional shape robot based on iGPS [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 200-205.

[3] 张俊康, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼薄膜蒙皮形状监测光纤传感方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 66-72.

ZHANG J K, SUN G K, LI H, et al. Optical fiber shape sensing of polyimide skin for flexible morphing wing [J], Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 66-72.

[4] 孙溢膺, 董明利, 乔玉军. 基于摄影测量的大型风机叶片运行模态分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 165-172.

SUN Y Y, DONG M L, QIAO Y J. Operation modal analysis of large wind turbine blades based on photogrammetry [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (10): 165-172.

[5] 黄桂平, 马开锋, 柏宏武, 等. 大型可展开天线型面热变形近景摄影测量[J/OL]. 机械工程学报. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187. TH. 20191-224. 1500. 162.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20191-224.1500.162.html).

HUANG G P, MA K F, BO H W, et al. Close-range photogrammetry for surface thermal deformation of large-scale deployable antennas[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187. TH. 20191224. 1500. 162.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20191224.1500.162.html).

[6] OZAWA S, FUKATSU A, SHIMIZU K. Thermal deformation measurement of onboard antenna reflector in thermal vacuum chamber by photogrammetry [C]. 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 7th, 2013. DOI: 10. 2514/6. 2006-2007.

[7] WHITMAN T L, WELLS C, HADAWAY J B, et al. Alignment test results of the JWST pathfinder telescope

- mirrors in the cryogenic environment [C]. Space Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2016.DOI:10.1117/12.2233421.
- [8] ZHANG Z S, ZHU L C, TANG W, et al. Unit panel node detection by CNN on FAST reflector [J]. Research in Astronomy and Astrophysics (RAA), 2019 (1): 113-122.
- [9] 李巍,董明利,孙鹏,等.大尺寸摄影测量局部参数优化相对定向方法[J].仪器仪表学报,2014,35(9):2053-2060.
- LI W, DONG M L, SUN P, et al. Relative orientation method for large-scale photogrammetry with local parameter optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 2054-2060
- [10] 崔晓川,郝继贵,隆昌宇.基于全局控制网的三维形貌测量方法[J].中国机械工程,2013,24(22):31-35.
- CUI X CH, ZHU J G, LONG CH Y. Method of 3D measurement by using global control net [J]. China Mechanical Engineering, 2013,24(22): 31-35.
- [11] 马彤彤.基于数字摄影扫描测量的逆向建模技术及其在某航空部件再制造中的应用[D].郑州:华北水利水电大学,2018.
- MA T T. The reverse modeling technique based on laser scanning plus digital Photogrammetry and the remanufacturing Application of an aviation component [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018.
- [12] 史传飞.面向大型产品的工业摄影测量技术与系统开发[D].南京:南京航空航天大学,2019.
- SHI CH F. Industrial photogrammetry technology research and system development for large-Scale equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [13] MENDIKUTE A, YAGUE-FABRA J A, ZATARAIN M, et al. Self-calibrated in-process photogrammetry for large raw part measurement and alignment before machining [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(9).
- [14] 刘桂华.基于计算机视觉的大型复杂曲面三维光学测量关键技术研究[D].重庆:西南交通大学,2012.
- LIU G H. Study on the key technologies of 3D optical measurement for large-scale complex surface based on computer vision [D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [15] 李云雷,张曦,屠大维.形貌视觉测量中立体拼接靶标的设计及应用[J].仪器仪表学报,2017,38(9):2161-2169.
- LI Y L, ZHANG X, TU D W. Design and application of 3D target for stitching in shape vision measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2161-2169.
- [16] 梁静,董岚,王铜,等.近景摄影测量技术在粒子加速器准直中的应用[J].强激光与粒子束,2019,31(3):35102.
- LIANG J, DONG L, WANG T, et al. Application of close-range photogrammetry to particle accelerator alignment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(3): 35102.
- [17] KUKLOVA Z, BUJNAK M, PAJDLA T. Polynomial eigenvalue solutions to minimal problems in computer vision[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2011, 34(7): 1381-93.
- [18] 张征宇,朱龙,黄叙辉,等.基于前方交会的5点相对定向[J].光学学报,2015,35(1):115001.
- ZHANG ZH Y, ZHU L, HUANG X H, et al. Five-point relative orientation based on forward intersection [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 115001.
- [19] HARTLEY R, LI H D. An efficient hidden variable approach to minimal-case camera motion estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012,34(12):2303-2317.
- [20] NISTER D. An efficient solution to the five-point relative pose problem[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2004,26(6):756-770.
- [21] 燕必希,董明利,王君,等.长度约束下双相机外参数不稳定定向[J].仪器仪表学报,2015,36(6):1326-1332.
- YAN B X, DONG M L, WANG J, et al. Unstable calibration of exterior orientation elements of dual-camera under length constraints[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6): 1326-1332.
- [22] 占栋,于龙,肖建,等.多摄像机结构光大视场测量中全局标定方法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(4):903-912.

ZHAN D, YU L, XIAO J, et al. Study on multi-cameras and structured-light vision system calibration approach study in large filed view measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 903-912.

作者简介



韩首榜, 2016 年于河南理工大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为光电与视觉测量。

E-mail: hanshoubang666@163.com

Han Shoubang received his B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2016. He is currently a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes photoelectric and vision measurement.



董明利(通信作者), 1986 年和 1989 年于合肥工业大学分别获得学士和硕士学位, 2009 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为视觉测量和精密仪器及机械。

E-mail: dongml@bistu.edu.cn

Dong Mingli (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hefei University of Technology in 1986 and 1989, respectively, and received her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2009. She is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include vision measurement and precision instrument and machinery.



孙鹏, 2005 年和 2008 年于北京信息科技大学分别获得学士学位和硕士学位, 2019 年于北京邮电大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学副研究员, 主要研究方向为近景摄影测量、视觉检测。

E-mail: sunpeng@bistu.edu.cn

Sun Peng received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Beijing Information Science and Technology University in 2005 and 2008, respectively, and received his Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunicates. He is currently an associate research professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include close range photogrammetry and vision measurement.