

文章编号: 1001-4888(2017)05-0593-08

大型结构变形监测摄像测量研究进展^{*}

尚洋^{1,2}, 于起峰^{1,2}, 关棒磊^{1,2}, 孙聪^{1,2}, 钟立军^{1,2}, 刘海波^{1,2}, 张小虎^{1,2}

(1. 国防科技大学航天科学与工程学院, 长沙 410073; 2. 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 桥梁、隧道、舰船等大型结构变形的全场、高精度、动态测量, 是其动态性能实验和质量监测的基本要求。摄像测量具有非接触、高精度、可测点多、实时动态测量等特点, 在大型结构的变形监测方面有独特的优势。本文介绍了作者所在科研团队近年来利用摄像测量技术在大型结构变形监测方面的研究新成果和典型应用, 包括提出位移传递像机串联网摄像测量方法与技术, 用于自动监测高速铁路、隧道等大型结构的路基沉降; 研制天线基座变形摄像测量系统, 实时、连续、长时间测量我国远望号测量船的天线基座变形等。

关键词: 摄像测量术; 大型结构; 变形测量; 像机网络

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-305

0 引言

大型结构变形的测量在建筑工程、机械制造及质量监测等领域有着广泛的应用需求, 是实验力学的基本任务之一, 也是实验力学向大尺度、超大尺度测量领域发展的重要方向之一^[1]。对这些大型结构变形的测量、长期的动态实时监测等, 可以为维护、维修、管理决策与性能评估等提供依据。以大型建筑设施和舰船变形测量为例:

(1) 国家每年投入大量资金进行公路、铁路和地铁等交通设施的建设, 修建了大量桥梁、隧道等大型建筑设施。由于技术条件的限制, 至今还难以对大型建筑设施实现长达十年乃至数十年长期的稳定性监测。因此, 也难以长期记录诸如大型桥梁、隧道、轨道路基、水利大坝、高层建筑、山区高边坡等大型工程结构的服役状态, 使得对于它们的日常养护、安全评价以及维修加固等都缺乏必要数据资料, 更不可能对其危险状态实现预警预告。这也是屡屡发生各种突发断桥、地面塌陷、建筑垮塌事故的一个重要因素。为减少灾难性突发事件的发生, 急需研制沉降变形自动监测系统, 建立起能用于大规模沉降变形监测的全天候、全自动长期监测网络, 实时提供被测设施的沉降状态, 并根据预先设置的参数实现及时的安全预警预告。

(2) 现代舰载武器系统与观测系统随着射程、作用距离的增大和精度要求的提高, 对精确的姿态基准信息的需求量不断增长。采用集中式姿态基准无法消除船体变形引起的误差。采用分立式姿态基准虽能消除甲板变形引起的误差, 但局部基准之间的时间同步比较困难, 不利于舰上分布式指控系统的发展, 而且在甲板面上布置过多的局部基准既困难也很不经济^[2]。国内外较多使用主从惯导系统传递对准方法对武器装备的姿态角进行精确对准。该方法有两个不利因素: 舰船变形因素会影响到该方法的精度; 高精度的惯导系统价格非常昂贵。采用对船体挠曲变形建模与补偿提高对准精度的方式, 由于建

^{*} 收稿日期: 2017-07-03; 修回日期: 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助(Grant No. 11332012, 11472302)

通讯作者: 于起峰(1958—), 男, 教授、中国科学院院士。主要研究领域为摄像测量、光测实验力学。Email: yuqifeng@vip.sina.com

模困难、舰船类型、负载变换等原因有着较大的应用困难。因此迫切需要一种低成本、高精度、高实时性的解决方案,用于测量舰载武器系统相对局部基准的位置姿态等信息,并据此对武器的初始姿态或对准方向进行修正。

传统接触式的测量方法会对测量对象本身造成干扰,而且测量系统布置繁琐、测量点有限,无法满足对大型结构变形进行全场、高精度测量以及动态监测的需求。而摄像测量具有非接触、高精度、可测点多、实时性好、可动态测量等优点,这些特点相比于其他测量方法具有突出的优势,更有可能解决大型结构变形测量的应用需求。目前摄像测量技术已经广泛应用于各种精密测量和运动测量,涉及到航空航天、国防试验、勘察勘测、交通运输、建筑施工、体育运动等各个领域,例如在航天和武器试验测试、航母工程试验测试等任务中,基于光电经纬仪、高速相机等光电成像设备获取试验图像并进行目标检测、识别、提取和三维轨迹、三维姿态等运动参数测量;在工业零部件加工质量检测中,应用光电成像在线进行目标形状尺寸测量、三维表面重建等,实现对零部件表面缺陷等的检测;在建筑、铁路、公路等工程中基于光电成像进行建筑表面、铁轨、路面等的变形测量、裂纹检测等^[3]。

针对前述大型结构形貌与变形测量的需求,我们先后提出和实现了多种摄像测量方式和方法,研制开发了多种新型摄像测量系统。包括提出位姿传递像机串联网络摄像测量方法与技术,用于船体等大型结构、不稳定平台的静态基准转换,以及地下工程、边坡等的多点变形长期动态监测;采用多摄像机联合组网,用于机翼、风电叶片等大型结构形貌与变形的高精度测量;在投影轮廓线辅助下进行多部像机组网,用于对大型堆场三维形貌、料堆体积和高程等的高精度测量等^[1]。这些方法技术有效解决了相关国民经济和国防建设中的困难问题。

近年来,我们在大型结构变形摄像测量方面开展了一系列新的研究,例如针对高速铁路、隧道等大型结构的路基沉降监测和我国“远望号”航天测量船天线基座变形测量需求,分别提出了位移传递像机串联网络摄像测量方法^[4-8]和天线基座变形摄像测量方法^[9],并开发样机,开展了试验验证测试,能够高精度获得相应的变形参数。本文主要对这两方面研究工作的背景、原理以及研究进展情况进行介绍。

1 位移传递像机串联网络摄像测量及路基沉降测量

桥梁、隧道、铁路、楼房、堤坝等基础设施路基的微小沉降,可能会造成路面、壁面以及堤坝等产生裂缝,影响人们日常生活,严重者将导致坍塌事故,造成重大财产损失和人员伤亡。因此迫切需要研究开发出能够自动、实时对路基进行监测的测量方法和系统,并建立相应的预警机制,防患于未然。

针对不通视目标的位置、姿态及其变形测量问题,提出了位姿传递像机串联网络摄像测量的概念和方法,我们曾称之为“折线光路摄像测量”或“像机链位姿传递摄像测量”,并将其应用于船体变形测量^[10-14]。位姿传递像机串联网络摄像测量方法是指通过多个测量传递站逐级构成像机串联网络,将空间任意区域联系起来,并综合利用各种三维测量技术和算法,高精度测量待测目标相对于测量基准的位置和姿态变形六自由度数据。

对于高速铁路、隧道等大型结构的路基沉降监测,主要是需要监测路基在垂直方向的沉降量。因此区别于位姿传递像机串联网络摄像测量,我们提出了位移传递像机串联网络摄像测量的概念和方法,也曾称之为“位移传递像机链摄像测量”,并基于该原理,正在国家自然科学基金重点项目资助下,与东南大学土木工程学院光测力学课题组合作开展大型工程结构沉降位移监测方法及监测预警系统研究^[4-8]。本方法打破了传统方法中需要像机光轴调水平或者像机自稳装置的约束,突破解决了实际工程中长期监测时测量设备安装位置本身可能存在沉降和倾斜这一测量难题。

1.1 测量原理

通过设计位移传递像机串联网络完成对待测区域多目标的实时监控,主要是在各待测点处安装测量单元,多头像机单元和合作标志单元交替出现,从而构成位移传递像机串联网络。

不失一般性,以图 1 所示路基单侧位移传递像机串联网络沉降监测为例建立监测模型。该位移传递像机串联网络摄像测量系统在相邻多头像机站之间设置两个标志,且像机串联网络中的多头像机均为双头像机,测量过程中要求像机可同时对左侧或右侧两个标志成像。

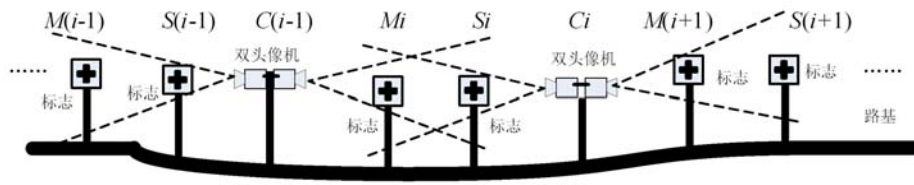


图1 位移传递像机串联网摄像测量系统设计

Fig. 1 Design of displacement-relay videometric system

我们设计的位移传递像机串联网摄像测量系统中有两种基本约束:

1) 固连约束: 双头像机由两个相同型号的单头像机朝相反的方向固连在一条直线上, 具有相同的沉降、俯仰以及旋转等变化;

2) 同名约束: 同一合作标志可能被不同的像机拍摄到, 但其实际的沉降变化量不变。

如图1所示, 从左至右记合作标志与双头像机测量单元编号为 $M1$ 、 $S1$ 、 $C1$ 、 $\dots$ 、 M_i 、 S_i 、 C_i 、 $M(i+1)$ 、 $S(i+1)$ 、 $C(i+1)$ 、 $\dots$ 、 $M(n+1)$ 、 $S(n+1)$, 则位移传递像机串联网中共有 n 个双头像机和 $2n+2$ 个合作标志测量单元。当不考虑像机的旋转时, 双头像机 C_i 所拍摄左侧两个、右侧两个标志在竖直方向位移量的运算公式为^[4]:

$$\begin{cases} h_{M_i}^G = k_{M_i}^G (\Delta y_{M_i} - \Delta y^G - d_{M_i}^G \cdot \sin \theta^G) \\ h_{S_i}^G = k_{S_i}^G (\Delta y_{S_i} - \Delta y^G - d_{S_i}^G \cdot \sin \theta^G) \\ h_{M(i+1)}^G = k_{M(i+1)}^G (\Delta y_{M(i+1)} - \Delta y^G + d_{M(i+1)}^G \cdot \sin \theta^G) \\ h_{S(i+1)}^G = k_{S(i+1)}^G (\Delta y_{S(i+1)} - \Delta y^G + d_{S(i+1)}^G \cdot \sin \theta^G) \end{cases} \quad (1)$$

公式(1)中, 右上标为双头像机编号, 右下标为合作标志编号; h 为合作标志在像机图像中的竖直位移量; k 为图像对标志的放大倍数; Δy 为合作标志或双头像机处的路基沉降量; d 为双头像机与合作标志间的距离; θ^G 为编号为 C_i 的双头像机单元的俯仰角变化量。 h 可由相应标志点图像坐标的变化得到; d 、 k 具体数值可通过标定得到; Δy 、 θ 为监测量。前述位移测量原理是在双头像机光轴平行的条件下得到的, 因而双头像机间固联后如果像机光轴间不平行则会带来模型误差。但由于本文位移传递测量的是合作标志前后时刻的相对位移量, 即在位移方向上的位置变化量, 对于双头像机光轴间的不严格平行并不敏感。仿真分析表明, 只要双头像机光轴间调整的基本平行, 相对于位移测量精度, 像机光轴间不严格平行对位移测量结果带来的误差基本可以忽略不计, 因而可以不对双头像机固联关系进行精确标定。

按照图1所示的位移传递像机串联网测量单元的安装方式, 根据公式(1)可以列出 $4n$ 个方程, 但存在 $4n+2$ 个未知数: $2n+2$ 个合作标志沉降量, n 个双头像机沉降量以及 n 个像机俯仰角变化量。如果位移传递像机串联网中存在 $m \geq 2$ 个稳定点, 则根据公式(1)得到的方程中未知数个数 $4n+2-m$ 小于等于方程个数 $4n$, 方程组可解。该监测模型为一个未知数个数小于方程个数的线性方程组, 可由主成分分析方法精确求解。

1.2 试验验证情况

为了验证位移传递像机串联网摄像测量模型及其解算方法的正确性及实用性, 根据图1建立了路基沉降位移传递像机串联网实物系统, 其中包括: 合作标志测量单元、双头像机测量单元、数据传输系统以及数据处理终端。如图2所示, 从左至右将各测量单元分别编号为 $M1$ 、 $S1$ 、 $C1$ 、 $M2$ 、 $S2$ 、 $C2$ 、 $M3$ 、 $S3$ 、 $C3$ 、 $M4$ 、 $S4$ 。

我们通过大量的室内模拟实验来验证位移传递像机串联网的测量精度, 下面给出一组代表性的实验结果^[4]。设计实验如下: 首先记录初始时刻合作标志点位置及双头像机光轴俯仰角; 然后控制测量单元 $C1$ 、 $M2$ 、 $S2$ 、 $M3$ 、 $S3$ 、 $C3$ 同时产生一定量的沉降值, 并计算得到相对于初始时刻的沉降值以及测量偏差; 最后控制 $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 像机产生一定的俯仰角变化, 计算相对于各测量单元初始时刻的沉降值、双头像机的俯仰角变化量以及各测量值的偏差, 得到表1所示测量结果, 其中 y 表示测量单元沉降量, θ 表示测量单元俯仰角度量。例如, y_{C1} 、 y_{M2} 、 y_{S3} 分别表示图2中像机 $C1$ 、合作标志 $M2$ 、合作标志

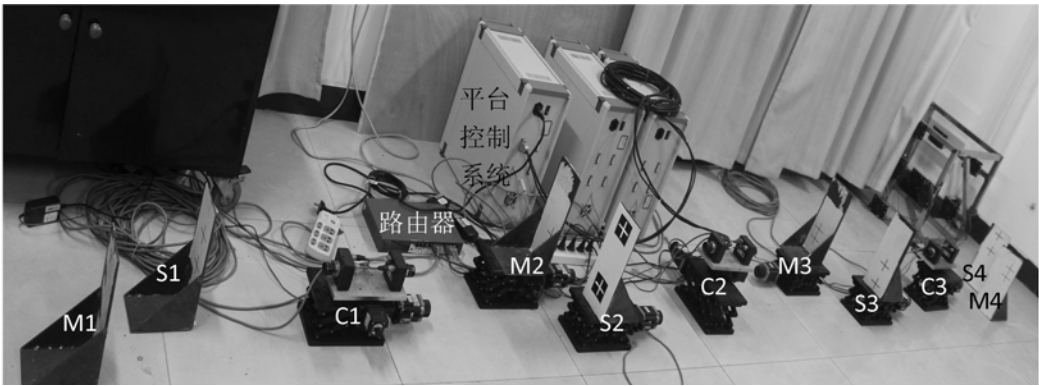


图 2 位移传递像机串联网络摄像测量系统
Fig. 2 System of displacement-relay videometric

S3 的沉降量, θ_{C2} 表示像机 C2 的俯仰角变化量等。

表 1 位移传递像机串联网络摄像测量系统测量结果
Tab. 1 Experiment result of displacement-relay videometric system

级数	y_C1 (mm)	θ_{C1} ($^{\circ}$)	y_M2 (mm)	y_S2 (mm)	θ_{C2} ($^{\circ}$)	y_M3 (mm)	y_S3 (mm)	y_C3 (mm)	θ_{C3} ($^{\circ}$)
初始值	97.4	—	116.5	87.5	—	93.2	118.9	97.5	—
变化后	89.4	—	120.3	91.2	—	88.6	115.0	88.8	—
沉降真值	8	—	—3.8	—3.7	—	4.6	3.9	8.7	—
测量值	7.45	—	—3.44	—3.62	—	4.40	2.90	8.59	—
偏差	0.55	—	0.36	0.08	—	0.2	1	0.11	—
俯仰变化	—	48	—	—	—12	—	—	—	—12
测量值	8.10	44.44	—2.12	—2.31	—14	4.86	3.37	8.82	—8.58
偏差	0.10	3.56	1.68	1.39	2	0.26	0.53	0.12	3.42

表 1 所示实验结果与真值相吻合,具有较高的测量精度。说明本方法不仅可以测量得到各测量单元正确的沉降值,而且可以测量得到像机光轴的俯仰变化量。但当位移传递像机串联网中同时存在沉降和像机光轴俯仰变化时,存在测量单元沉降测量误差大于 1mm 的情况,测量精度有所降低。

2 远望号天线基座变形测量

船体变形是我国航天测量船外测设备的一项重要误差源,例如测量船中 USB 跟踪雷达,其天线基座姿态随船体在动态测量过程中不停地变化^[15]。为消除天线基座变形引起的误差,目前测量船采用的光学变形测量系统,主要是通过中心惯导与外测设备基座之间用大钢管建立一个光学通道,采用光学准直法测量船体的纵挠角和艏挠角变形,同时利用大钢管作为参照基准采用光学自准直法测量横扭角变形,三个方向的测量精度均优于 5''^[16]。这种方法的优点是原理简单、测量精度高、技术成熟,缺点是大钢管作为封舱件,不但设备沉重、体积较大,且为确保横扭角的测量精度,对大钢管的安装有特殊要求,导致舰船结构的改造较大,给维护带来不便。因此,有必要探索新技术和新方法,改进现有船体变形测量设备。我们提出并研制了天线基座变形摄像测量系统,可实时、连续测量天线基座变形,具有系统组成简单、对船体结构改动小、使用维护方便、测量精度高的特点^[9]。

2.1 测量原理

图 3 为天线基座变形摄像测量的基本原理示意图,用于测量由船体振动、扭曲和弹性变形等导致的基准平台和待测平台之间的形变。由于实际情况中甲板平面方向的拉伸力在该方向上不会引起较大的

位移变形,在进行天线基座变形测量时可以忽略位移变形,仅考虑姿态变化^[15]。因此,在下面的分析中,我们可以假设测量像机的光心坐标固定不变,仅考虑坐标系姿态之间的变换。

假设 R_{IP} 、 R_{PC} 和 R_{UC} 分别表示基准坐标系 I 与合作标志坐标系 P 、合作标志坐标系 P 到像机坐标系 C 以及待测平台坐标系 U 到像机坐标系 C 之间的姿态变换,则基准坐标系 I 到待测平台坐标系 U 的姿态变换 R_{IU} 可以表示为

$$R_{IU} = R_{UC}^{-1} R_{PC} R_{IP} \quad (2)$$

在 P_{IP} 和 R_{UC} 已知的条件下,若能实时获得测量像机坐标系 C 与合作标志坐标系 P 之间的姿态旋转矩阵 R_{PC} ,即可求得待测平台相对于基准的姿态 R_{IU} 。

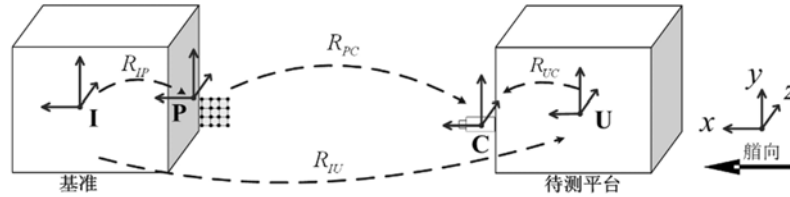


图3 天线基座变形测量的基本原理示意图

Fig. 3 Schematic of basic principle of videometrics method

规定姿态矩阵 R_{IU} 描述的欧拉角变换为:先绕 y 轴逆时针转 κ 角,其次绕 z 轴逆时针转 ψ 角,最后绕 x 轴逆时针转 θ 角。根据文献^[15]定义的船体变形角,船体变形艏扰角 κ_b 、纵扰角 ψ_b 、横扭角 θ_b 与等效欧拉角 κ 、 ψ 、 θ 的相互转换关系如下

$$\begin{cases} \kappa_b = -\arcsin(\sin\kappa\cos\psi) \\ \psi_b = \psi \\ \theta_b = \arcsin[\sin(\theta + \alpha)\cos\kappa/\cos\alpha] \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\alpha = \arctan(\tan\kappa\sin\psi_b)$ 。

由于在天线基座变形测量时可以忽略位移变形^[15],因此,在实际的测量过程中可以假设测量像机的光心坐标为常值。在设备安装好后,利用初始时刻的图像,通过文献^[17]描述的正交迭代算法,求得测量像机相对合作标志的光心坐标。因此,在后续的变形测量中像机光心坐标均作为已知量。此外,在后续的计算中,均假设 R_{PC} 的欧拉角分解次序定义为:先绕 y 轴逆时针转 κ_{PC} 角,其次绕 z 轴逆时针转 ψ_{PC} 角,最后绕 x 轴逆时针转 θ_{PC} 角。

天线基座变形的实时求解包括以下几个步骤^[9]:第一步,利用 k 时刻像机姿态角的预测值 $\hat{\kappa}_{PC}(k)$ 、 $\hat{\psi}_{PC}(k)$ 、 $\hat{\theta}_{PC}(k)$,计算获得测量像机图像中合作标志的位置,并在以预测位置为中心的区域提取合作标志中心位置;第二步,根据提取的合作标志及其对应的局部坐标,利用扩展 Kalman 滤波算法计算获得 k 时刻欧拉角估计值 $\kappa_{PC}(k)$ 、 $\psi_{PC}(k)$ 、 $\theta_{PC}(k)$,并结合式(2)和式(3)得到 k 时刻的天线基座变形角;第三步,根据构建的预测方程,获得 $k+1$ 时刻像机姿态角的预测值。一旦获得 $k+1$ 时刻像机姿态角的预测值,跳至第一步,重复上述的三个步骤。

2.2 试验测试情况

远望号天线基座变形摄像测量设备主要包括:高分辨测量像机、合作标志(包括 11 个局部坐标已知的异面十字控制点),以及安装有时统卡的数据处理计算机。设备布置方案如图 4 所示,分别拆除光学变形测量系统中的艏挠发射光管和艏挠接收光管,用于安装测量像机和合作标志,同时利用大钢管提供的通路实现通视测量。其中,合作标志安装在原变形艏挠发射光管处且与雷达吊桶固联,测量像机安装在原变形艏挠接收光管处且与惯导吊桶固联。在安装过程中,合作标志及测量像机的坐标系基准与光学变形测量系统的安装基准面平齐,尽可能使得合作标志及测量像机坐标系分别与艏挠发射光管、接收光管的坐标系平行,以确保与目前光学变形测量系统数据的可比对性。

我们在测量船漂行、正常航行以及摇摆试验状态下,进行了天线基座变形的测量试验。图 5 给出了测量船摇摆状态下的部分测量结果^[9]。

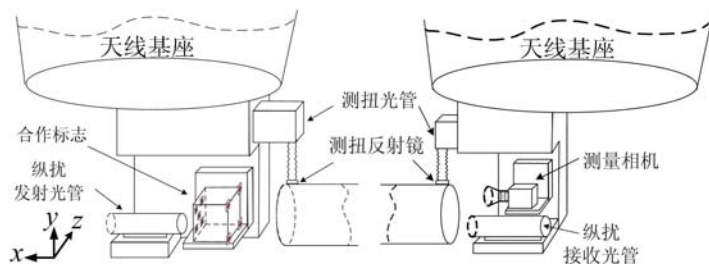


图 4 天线基座变形摄像测量设备安装示意图

Fig. 4 Schematic of setup for our system based on videometrics

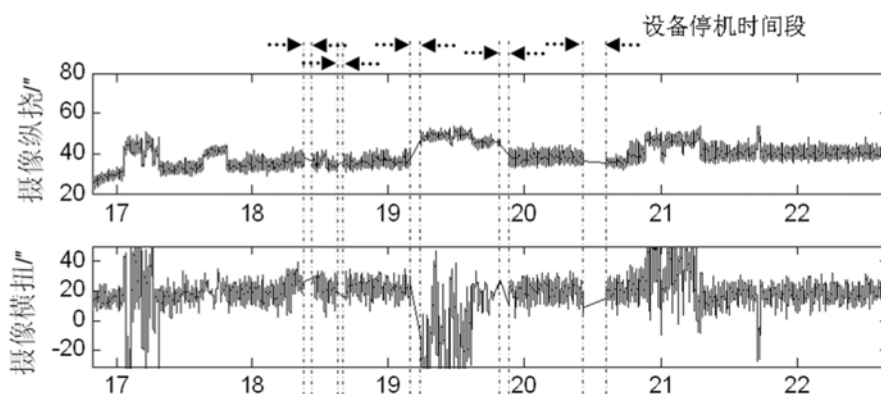


图 5 天线基座变形测量结果

Fig. 5 Measurement results on the sea

实验表明天线基座变形摄像测量系统的测量数据与目前测量船中光学变形测量系统数据的一致性较好,纵挠和横扭的偏差均方根分别为 $3.7''$ 和 $5.6''$,表明该摄像测量系统与现有测量船装备设备的测量精度相当,可以实现 $5''$ 精度的天线基座变形测量。而与光学变形测量系统相比,天线基座变形摄像测量方法无需其他辅助设备和措施,可实时、连续、长时间测量远望号天线基座的三维角度变形,具有设备简单轻巧的特点。

3 结论

本文介绍了作者所在科研团队近年来在大型结构变形摄像测量方面部分新的研究成果。其中,位移传递像机串联网摄像测量方法,突破解决了实际工程中长期监测时测量设备安装位置本身可能存在沉降和倾斜这一测量难题,可实现对铁路路基等沉降量的精确测量;天线基座变形摄像测量方法及系统无需其他辅助设备和措施,实现了 $5''$ 精度的天线基座变形实时、连续测量。摄像测量方法为大型结构变形参数的实时、动态、高精度测量提供了有力的理论和技术支持。本文研究成果进一步拓展了摄像测量的应用范围,并增强了摄像测量在宏观测量方面的工程实用性,有广泛的应用前景。

本文工作得到国家自然科学基金资助(Grant No. 11332012, 11472302)。

参考文献:

- [1] 于起峰, 尚洋, 伏思华, 等. 大型结构变形及形貌摄像测量技术研究进展[J]. 实验力学, 2011, 26(5):479-490 (YU Qifeng, SHANG Yang, FU Sihua, et al. Development of videometrics for large-scale structural deformation and topography measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):479-490 (in Chinese))
- [2] 万德钧, 刘玉峰. 消除舰船变形的影响和为全舰提供高精度姿态基准[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(4):77

- 82 (WAN Dejun, LIU Yufeng. Summary on removing influence of ship deformation and providing accurate attitude references for warship[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(4):77—82 (in Chinese))
- [3] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009 (YU Qifeng, SHANG Yang. Videometrics: principles and Researches[M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese))
- [4] 许勇. 基于位移传递像机链摄像测量的路基沉降自动监测方法研究[D]. 国防科技大学硕士学位论文, 2013 (XU Yong. Research on key technology of roadbed subsidence displacement-relay camera network videometrics [D]. National University of Defense Technology, 2013 (in Chinese))
- [5] Shang Y, Yu Q, Xu Y, et al. An innovative multi-headed camera network: a displacement-relay videometrics method in unstable areas[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2014:871—874.
- [6] Yu Q F, Jiang G W, Shang Y, et al. A displacement-relay videometric method for surface subsidence surveillance in unstable areas[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(6):1105—1111.
- [7] Yu Q F, Shang Y, Guan B L, et al. Camera series and parallel networks for deformation measurements of large scale structures[C]//Proc. SPIE 9530, Automated Visual Inspection and Machine Vision, 2015:953002.
- [8] Dong S, Shao X X, Kang X, et al. Extrinsic calibration of a non-overlapping camera network based on close-range photogrammetry[J]. Applied Optics, 2016, 55(23):6363—6370.
- [9] Haibo Liu, Cong Sun, Yueqiang Zhang, et al. Hull deformation measurement for spacecraft TT&C ship of China by photogrammetry[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(8):1339—1347.
- [10] 于起峰, 姜广文, 丁晓华, 等. 测量大型船体变形的折线光路摄像测量方法与系统研究[C]. 中国力学学会学术大会, 2007 (YU Qifeng, JIANG Guangwen, DING Xiaohua, et al. Fold-ray videometrics method and system for the deformation measurement of large ship[C]. The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2007 (in Chinese))
- [11] Yu Q, Jiang G, Fu S, et al. Broken-ray videometric method and system for measuring the three-dimensional position and pose of the non-intervisible object[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2008, 37(B5):145—148.
- [12] Yu Q, Jiang G, Fu S, et al. Measuring deformation of large vessels with innovative broken-ray videometrics [C]//in the 22nd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Adelaide, Australia, 2008.
- [13] Yu Q, Jiang G, Fu S, et al. Fold-ray videometrics method for the deformation measurement of nonintervisible large structures[J]. Applied Optics, 2009, 48(24):4683—4687.
- [14] 姜广文. 像机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究[D]. 国防科技大学博士学位论文, 2010 (JIANG Guangwen. Research on pose relay videometrics with camera-series and ship deformation measurement [D]. National University of Defense Technology, 2013 (in Chinese))
- [15] 潘良. 航天测量船船姿船位测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008 (PAN Liang. Aerospace measurement ship position measurement technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008 (in Chinese))
- [16] 李岷, 张尧禹, 李岩, 等. 基于测量船角变形光电测量系统的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2006, 29(3):14—15 (LI Min, ZHANG Yaoyu, LI Yan, et al. Research of angle diatortion for measuring ship[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2006, 29(3):14—15 (in Chinese))
- [17] Lu C P, Hager G D, Mjolsness E. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6):610—622.

Recent Advances of Videometrics for Large-Scale Structure Deformation Monitoring

SHANG Yang^{1,2}, YU Qi-feng^{1,2}, GUAN Bang-lei^{1,2}, SUN Cong^{1,2},
ZHONG Li-jun^{1,2}, LIU Hai-bo^{1,2}, ZHANG Xiao-hu^{1,2}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, Changsha 410073, China)

Abstract: The full scale, high precision and dynamic deformation measurement of large-scale structure, such as bridge, tunnel, ships and so on, is a basic requirement for their dynamic performance experiment and quality monitoring. Compared with other measurement means, videometrics has a lot of advantages in large-scale structure deformation measurement. It can conduct non-contact, real-time dynamic measurement with high precision and multi measuring points. It has unique advantages in deformation monitoring of large-scale structure. In this paper, in large-scale structure deformation monitoring, new achievements and typical applications of videometrics technology obtained by author's research team in recent years are introduced. It includes the measurement method and technology of displacement transfer and camera series network photography. It can be used to automatically monitor subgrade settlement of high-speed railway, tunnel and other large-scale structures. A camera measurement system was developed. It can real time and continuously measure the deformation of antenna pedestal on observation boat "Far Sight" for a long time.

Keywords: videometrics; large-scale structure; deformation measurement; camera network