

# 基于传递像机的移动摄像测量方法

张林龙<sup>1</sup>, 张 伟<sup>2</sup>, 胡昌华<sup>1</sup>, 刘炼雄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>火箭军工程大学控制工程系, 陕西 西安 710025;

<sup>2</sup>火箭军工程大学信息工程系, 陕西 西安 710025

**摘要** 针对大型结构表面积较大而像机视野有限的问题, 提出了一种基于传递像机的移动摄像测量方法, 该方法可对大型结构进行全局扫描测量。利用固定连接于移动平台的传递像机对基准标识点进行图像采集, 采用像机参数标定方法对传递像机的外参数进行计算, 得到相邻时刻移动平台坐标的相对转换关系。测量像机在移动平台的驱动下围绕结构表面采集特征点, 利用运动平台坐标的转换关系计算得到测量像机的实时外参数。建立等效双目交会共线方程, 并对特征点位置进行计算, 在初始位置完成参数标定后, 即可实现自动测量。实验结果表明, 所提出的移动摄像测量方法的测量精度可达 2.012 mm, 且自动化程度较高, 可应用于大型结构的在线监测。

**关键词** 测量; 全局测量; 传递像机; 测量像机; 在线监测

**中图分类号** P231.5 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0412001

## Mobile Videometrics Method Based on Relay Camera

Zhang Linlong<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>2</sup>, Hu Changhua<sup>1</sup>, Liu Lianxiong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Control Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

<sup>2</sup>Department of Information Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

**Abstract** Aiming at the problem that the large-scale structure's surface is large and the vision of camera is limited, a mobile videometrics method based on relay camera is proposed, and the global scanning measurement is carried out for large-scale structures. Reference mark points are acquired by relay camera fixed on the mobile platform. Extrinsic parameters of relay camera are calculated by the camera parameter calibration method, and the relative conversion relationship among mobile platform coordinates at adjoining times is obtained. A measurement camera goes around structure surface and acquires feature points, which is driven by mobile platform. After that, the real-time extrinsic parameters of the measurement camera can be obtained by the conversion relationship among mobile platform coordinates, and the equivalent binocular intersection collinear equation is established to calculate the positions of feature points. The automatic measurement is realized after completing parameter calibration at initial position. Experiments show that the measurement precision of the proposed method is 2.012 mm, and it is suitable for online monitoring large-scale structure with high degree of automation.

**Key words** measurement; global measurement; relay camera; measurement camera; online monitoring

**OCIS codes** 120.0280; 150.0155; 150.1488; 150.6910

## 1 引 言

摄像测量作为一种新型测量方法, 广泛应用于精密测量和动态测量等场合, 例如结构变形、运动目标位置及姿态测量等<sup>[1-4]</sup>。在许多场合, 需要测量的物体表面积较大, 例如隧道、风电叶片等, 但是单个像机的视野有限。为了利用摄像测量方法获得大型结构的全貌, 在待测目标模型已知的前提下, 可以采用像机组网方法对结构全局进行测量<sup>[5]</sup>。该方法的测量精度较高, 但是需要较多的图像采集设备, 如无缝钢管在线视觉检

**收稿日期:** 2016-09-28; **收到修改稿日期:** 2016-11-14

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金(61025014)、国家自然科学基金(61174030, 61104223)

**作者简介:** 张林龙(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事大型结构形变的摄像测量、安全性监测等方面的研究。

E-mail: zhanglinlong2010@163.com

**导师简介:** 张 伟(1966—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事故障预测和检测诊断方面的研究。

E-mail: zhang1966wei@163.com

测系统需要 20 多个像机同时进行图像采集<sup>[6]</sup>。

许多学者对像机移动情况下的摄像测量问题进行了研究,将像机在不同位置拍摄的大型目标图像进行拼接以获得物体的全貌。为了将像机在移动过程中采集到的标识点统一到全局世界坐标系下,需要建立全局坐标转换关系。谢光辉等<sup>[7]</sup>将平面靶标置于相邻时刻像机测量区域的公共部分,提取公共部分特征点位置,并对像机位置与姿态角进行求解,建立不同测量区域的对应关系以实现数据拼接。张洪涛等<sup>[8]</sup>以经纬仪空间坐标测量系统和靶标为中介,实现了多视觉传感器测量系统的坐标统一。但这些方法仅适用于静态或者离线测量,且要建立在结构表面标识点位置始终不变或部分标识点位置已知的前提下,对位置变化的标识点则无法进行在线测量。

为保证测量平台不稳定时的测量精度,于起峰等<sup>[9]</sup>提出了基于传递像机的不稳定平台静态基准转换方法,该方法可对静态目标进行局部测量,但是在大型结构的全局测量或动态目标的测量方面存在一定的局限性。为了满足大型结构测量的全局性、动态性要求,本文提出了一种基于传递像机的移动在线摄像测量方法,该方法利用传递像机采集的固定标识点图像像素坐标与标识点世界坐标之间的关系得到传递像机外参数,从而通过计算得到移动平台的运动参数。在已知测量像机内参数以及测量像机与平台的固定位置关系的情况下,该方法可由平台运动参数计算得到测量像机的实时外参数关系,并且可以建立任意时刻的双目交会共线方程,从而得到测量点的实际位置。该方法不仅可以解决大型结构的全局性测量要求,而且能够用来测量动态目标。

## 2 移动摄像测量原理

在进行移动摄像的测量过程中,像机位置不断变化,如图 1 所示,左右像机的位置分别为同一像机在相邻时刻(相邻时刻指像机相邻两次采集图像的时刻) $t_i$ 、 $t_j$  的位置,与此对应,可建立运动的像机坐标系  $O-X_{c,i}Y_{c,i}Z_{c,i}$  和  $O-X_{c,j}Y_{c,j}Z_{c,j}$ ,两个像机坐标系相对于世界坐标系  $O-XYZ$  的旋转矩阵和平移向量分别表示为  $\mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i$  与  $\mathbf{R}_j, \mathbf{T}_j$ ;相邻时刻像机坐标系间的相对旋转矩阵和平移向量分别表示为  $\mathbf{R}_{i,j}, \mathbf{T}_{i,j}$ 。像机采集的公共目标点设为  $P_w(x_w, y_w, z_w)$ ,对应时刻像机的成像点在图像坐标系中的位置分别为  $p_i(x_i, y_i)$ 、 $p_j(x_j, y_j)$ ,公共目标点  $P_w, p_i, p_j$  对应的齐次坐标关系可分别表示为  $\mathbf{X}_w, \mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$ 。

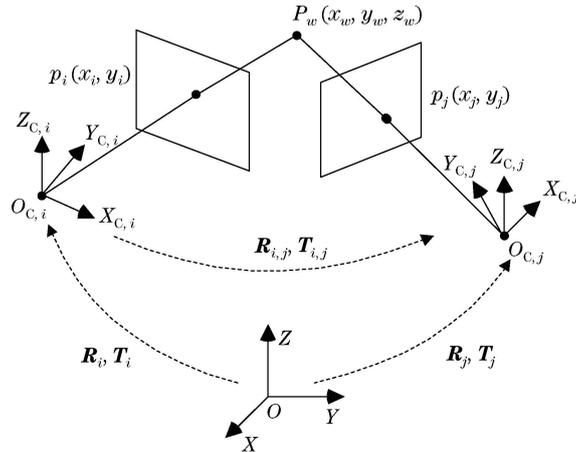


图 1 移动摄像测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of mobile videometrics principle

根据摄像测量原理,测量点  $P_w$  与图像坐标点  $p_i, p_j$  的关系在齐次坐标系下可表示为

$$\begin{cases} \lambda_i \mathbf{X}_i = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & \mathbf{T}_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \mathbf{X}_w \\ \lambda_j \mathbf{X}_j = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_j & \mathbf{T}_j \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \mathbf{X}_w \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $\lambda_i$  与  $\lambda_j$  为比例系数,  $\mathbf{K}$  为像机内参数矩阵,  $\mathbf{R}_i, \mathbf{R}_j$  与  $\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j$  分别为相邻时刻  $t_i, t_j$  世界坐标系转换

到像机坐标系下的旋转矩阵与平移向量。相邻时刻所处不同位置的像机可以等价为主目摄像测量系统,根据摄像测量原理,联立(1)式可建立双目交会共线方程,在像机内外参数已知的情况下即可得到测量点的位置坐标。

像机内参数可以采用传统标定方法得到<sup>[10]</sup>,然而外参数  $R_i$  与  $T_i$  均随时间变化。即使固定像机的平台运动参数已知,也不能保证利用平台运动参数计算得到的理想情况下测量像机的外参数与实际测量过程中的外参数一致,而且还会存在误差的积累。因此,为了实现高精度的移动在线测量,必须解决以下问题:1)对移动测量过程中的像机外参数进行实时标定,确保测量像机外参数的准确、稳定;2)建立统一的坐标转换关系,使像机在不同位置测量得到的测量点位置可以在同一个世界坐标系下表示。

### 3 移动测量像机外参数的实时求解

基于传递像机的移动摄像测量法原理如图 2 所示,测量像机和传递像机在移动平台的驱动下绕结构表面运动(运动轨道形状可根据测量对象的形状进行设计),传递像机实时拍摄粘贴于地面上的人工标识点,由于传递像机与测量像机的位置关系固定,因此可以根据传递像机的实时位置及姿态角计算运动平台在相邻时刻的状态转换关系,从而得到测量像机的外参数。在得到测量像机外参数的情况下,根据共线方程即可获得物体表面标识点的实时位置。

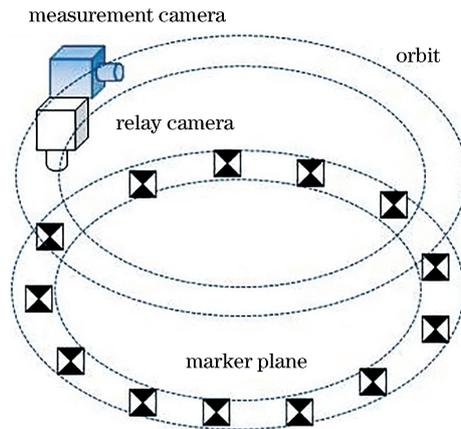


图 2 基于传递像机的移动摄像测量示意图

Fig. 2 Schematic of mobile videometrics based on relay camera

考虑到移动摄像测量方法在测量大型结构时需要大量的人工标识点,如果采用编码方式对特征点进行区分,则需要对编码标识点的制作和粘贴,工作量较大,所以这里采用形状和大小完全相同的非编码标识点。根据运动平台设定的运动规律,利用 Kalman 滤波对传递像机的实时位置进行估计,然后在数据库中自动搜索并匹配标识点的实际位置,建立标识点世界坐标位置与像素坐标位置的一一对应关系。

#### 3.1 移动平台在相邻时刻的状态转换

将测量系统中的传递像机与运动平台固定连接,首先建立传递像机坐标系  $O_T-X_T Y_T Z_T$  与运动平台坐标系  $O_B-X_B Y_B Z_B$ 。用  $X_i, X_j$  分别表示空间中某点在  $t_i, t_j$  时刻图像坐标系下的齐次坐标。世界坐标系与运动平台坐标系的齐次坐标关系以及运动平台坐标系与传递像机坐标系的齐次坐标关系分别为

$$\begin{cases} X_B = R_{WB} X_W + T_{WB} \\ X_T = R_{BT} X_B + T_{BT} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $X_B$  为空间点在运动平台坐标系下的齐次坐标;  $X_T$  为为空间点在传递像机坐标系下的齐次坐标;  $R_{BT}, T_{BT}$  分别为由运动平台坐标系转换到传递像机坐标系的旋转矩阵和平移向量,其具体关系固定,可采用辅助像机全视场标定法求得<sup>[11]</sup>;  $R_{WB}, T_{WB}$  分别为由世界坐标系转换到运动平台坐标系的旋转矩阵与平移向量。

根据(2)式,可以得到世界坐标系与传递像机坐标系之间的齐次坐标关系为

$$X_T = R_{WT} X_W + T_{WT}, \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{WT} = \mathbf{R}_{BT} \mathbf{R}_{WB} \\ \mathbf{T}_{WT} = \mathbf{R}_{BT} \mathbf{T}_{WB} + \mathbf{T}_{BT} \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{R}_{WT}$ 、 $\mathbf{T}_{WT}$  分别为由世界坐标系转换到传递像机坐标系的旋转矩阵与平移向量, 可以根据传统像机参数标定方法求得。

假设运动平台在相邻时刻  $t_i$  和  $t_j$  的齐次坐标分别为  $\mathbf{X}_{B,i}$  和  $\mathbf{X}_{B,j}$ , 则二者满足

$$\mathbf{X}_{B,j} = \mathbf{R}_{i,j} \mathbf{X}_{B,i} + \mathbf{T}_{i,j}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{R}_{i,j}$ 、 $\mathbf{T}_{i,j}$  为运动平台相邻时刻  $t_i$ 、 $t_j$  的变化参数。

由(2)式可以得到, 在  $t_i$  和  $t_j$  时刻, 世界坐标系与传递像机坐标系之间存在的转换关系为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{T,i} = \mathbf{R}_{WT,i} \mathbf{X}_W + \mathbf{T}_{WT,i} \\ \mathbf{X}_{T,j} = \mathbf{R}_{WT,j} \mathbf{X}_W + \mathbf{T}_{WT,j} \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{X}_{T,i}$ 、 $\mathbf{X}_{T,j}$  分别表示  $t_i$ 、 $t_j$  时刻待测量点在传递像机坐标系下的齐次坐标,  $\mathbf{R}_{WT,i}$ 、 $\mathbf{R}_{WT,j}$  分别为  $t_i$ 、 $t_j$  时刻由世界坐标系转换到传递像机坐标系的旋转矩阵,  $\mathbf{T}_{WT,i}$ 、 $\mathbf{T}_{WT,j}$  分别为  $t_i$ 、 $t_j$  时刻由世界坐标系转换到运动平台坐标系的旋转矩阵。

由(2)、(6)式可得

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{B,i} = \mathbf{R}_{BT}^{-1} (\mathbf{X}_{T,i} - \mathbf{T}_{BT}) \\ \mathbf{X}_{B,j} = \mathbf{R}_{BT}^{-1} (\mathbf{X}_{T,j} - \mathbf{T}_{BT}) \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{R}_{BT}^{-1}$  为旋转矩阵  $\mathbf{R}_{BT}$  的逆矩阵。

联立(5)~(7)式, 得到相邻间隔运动平台坐标系之间的外参数为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{i,j} = \mathbf{R}_{BT}^{-1} \mathbf{R}_{WT,j} \mathbf{R}_{WT,i}^{-1} \mathbf{R}_{BT} \\ \mathbf{T}_{i,j} = \mathbf{R}_{BT}^{-1} (\mathbf{T}_{WT,j} - \mathbf{T}_{BT}) - \mathbf{R}_{BT}^{-1} \mathbf{R}_{WT,j} \mathbf{R}_{WT,i}^{-1} (\mathbf{T}_{WT,i} - \mathbf{T}_{BT}) \end{cases} \quad (8)$$

### 3.2 测量像机的实时外参数计算

相邻采集图像时间点时像机所处的位置构成双目摄像测量系统, 为了得到待测量点的实际位置, 必须已知测量像机的外参数。根据平台的运动参数, 可计算得到测量像机在相邻时刻的外参数, 从而达到自动标定测量像机外参数的目的。

类似地, 在建立测量像机坐标系  $O_C-X_C Y_C Z_C$  的情况下, 运动平台坐标系与测量像机坐标系的齐次坐标关系分别为

$$\mathbf{X}_C = \mathbf{R}_{BC} \mathbf{X}_B + \mathbf{T}_{BC}, \quad (9)$$

式中  $\mathbf{R}_{BC}$ 、 $\mathbf{T}_{BC}$  分别为由运动平台坐标系转换到像机坐标系的旋转矩阵和平移向量,  $\mathbf{X}_C$  为待测量点在测量像机坐标系下的齐次坐标。

同样, 根据(9)式, 可得  $t_i$  和  $t_j$  时刻运动平台坐标系与测量像机坐标系满足

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{C,i} = \mathbf{R}_{BC} \mathbf{X}_{B,i} + \mathbf{T}_{BC} \\ \mathbf{X}_{C,j} = \mathbf{R}_{BC} \mathbf{X}_{B,j} + \mathbf{T}_{BC} \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $\mathbf{X}_{C,i}$ 、 $\mathbf{X}_{C,j}$  分别表示  $t_i$ 、 $t_j$  时刻待测量点在像机坐标系下的齐次坐标。

联立(5)、(10)式, 可得相邻时刻世界坐标系与测量像机坐标系之间存在的齐次坐标关系为

$$\mathbf{X}_{C,j} = \mathbf{R}_{BC} \mathbf{R}_{i,j} \mathbf{R}_{BC}^{-1} \mathbf{X}_{C,i} - \mathbf{R}_{BC} \mathbf{R}_{i,j} \mathbf{R}_{BC}^{-1} \mathbf{T}_{BC} + \mathbf{R}_{BC} \mathbf{T}_{i,j} + \mathbf{T}_{BC}. \quad (11)$$

由于运动平台与测量像机为刚性连接, 所以由运动平台坐标系转换到像机坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{BC}$  和平移向量  $\mathbf{T}_{BC}$  也为固定值, 标定方法同上。根据(11)式, 可以得到相邻时刻测量像机的坐标系之间的相对转换关系。同样, 选定初始时刻为  $\mathbf{X}_{C,i}$ , 则由(11)式可以依次迭代得到测量像机的实时世界坐标系相对世界坐标系的位置及姿态, 即测量像机的绝对外参数。

### 3.3 移动摄像测量算法

根据以上理论研究, 在平台移动过程中, 传递像机与测量像机同时围绕目标表面运动, 具体测量过程如下:

1) 建立世界坐标系、运动平台坐标系、传递像机坐标系与测量像机坐标系,运用像机的离线标定方法得到传递像机与测量像机内参数、初始时刻( $t_0$ )世界坐标系分别转换到传递像机坐标系与测量像机坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{WT,0}$  和  $\mathbf{R}_{WC,0}$ , 平移向量  $\mathbf{T}_{WT,0}$  和  $\mathbf{T}_{WC,0}$ , 传递像机和测量像机分别相对平台坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{BT}$  和  $\mathbf{R}_{BC}$ , 以及平移向量  $\mathbf{T}_{BT}$  和  $\mathbf{T}_{BC}$ ;

2) 根据像机参数标定方法,计算测量过程中  $t_i$  时刻传递像机相对世界坐标系的外参数  $\mathbf{R}_{WT,i}$  与  $\mathbf{T}_{WT,i}$ ;

3) 根据(8)式,计算运动平台在相邻时刻  $t_i, t_j$  的变化参数  $\mathbf{R}_{i,j}$  与  $\mathbf{T}_{i,j}$ ;

4) 建立如(1)式所示的共线方程组,则有

$$\begin{cases} \lambda_i \mathbf{X}_i = \mathbf{K} \mathbf{X}_{C,i} \\ \lambda_j \mathbf{X}_j = \mathbf{K} \mathbf{X}_{C,j} \end{cases}, \quad (12)$$

$\mathbf{X}_{C,i}, \mathbf{X}_{C,j}$  二者满足如(11)式的固定约束关系,且  $\mathbf{X}_{C,i}$  的初始像机位置满足

$$\mathbf{X}_{C,0} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{WC,0} & \mathbf{T}_{WC,0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \mathbf{X}_w, \quad (13)$$

求解(12)式即可得到待测量点  $P_w(x_w, y_w, z_w)$  的世界坐标;

5) 在移动平台的运动过程中不断重复 2)~4), 即可得到不同测量点的实时世界坐标位置,从而完成移动式像机的测量。

至此,在传递像机的实时外参数标定过程中完成了移动测量像机的在线测量。由于(11)式的相互迭代,测量像机的坐标系转换关系始终处于固定世界坐标系下,所以求解得到的测量点的位置也被统一到相同的世界坐标系。

## 4 实验研究

### 4.1 验证实验

为了验证所提出的测量方法的正确性与可行性,设计如图 3 所示的实验。将传递像机与测量像机固定在运动平台上,其中待测量目标为金属结构平台(尺寸为 5000 mm×2000 mm×350 mm)上的表面标识物,地面上沿平行轨道粘贴含有多个人工标识点的标定条,以便传递像机在移动过程中进行参数标定。实验过程中采用的传递像机与测量像机的分辨率均为 1280 pixel×1024 pixel,像素尺寸为 5.3 μm×5.3 μm,其中标定条中相邻标识点之间的距离为 40 mm。

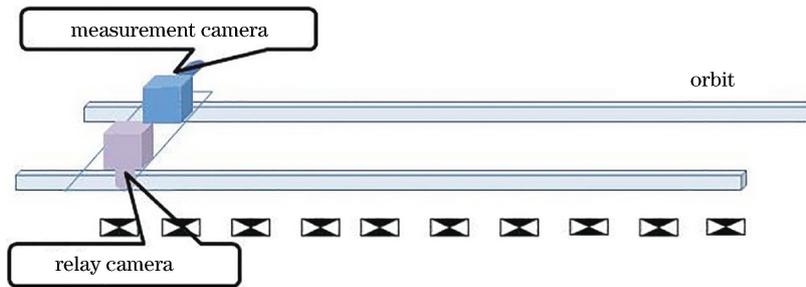


图 3 传递像机的移动摄像测量实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup diagram of mobile videometrics of relay camera

首先,按照上述测量流程对实验过程中的固定参数进行标定;然后移动平台,使其沿平行轨道做匀速直线运动。为保证每个待测点能被相邻时刻像机所处位置拍摄 2 次以上,实验过程中设定平台的运动速度为 20 mm/s,设定传递像机与测量像机进行图像同步采集,帧频为 3 frame/s。实验过程中采集的部分帧图像如图 4 所示,第一行图像为传递像机采集标定条过程中的部分图像,第二行图像为测量像机测量目标结构表面采集得到的部分图像。

将实验过程中测得的结构表面 215 个标识点的位置在 Matlab 中立体显示,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,测量得到的目标点能够反映出结构表面的标识点位置。为了更加直观地显示测量精度,计算得到 215 个标识点测量位置与实际位置的距离误差,如图 6 所示。

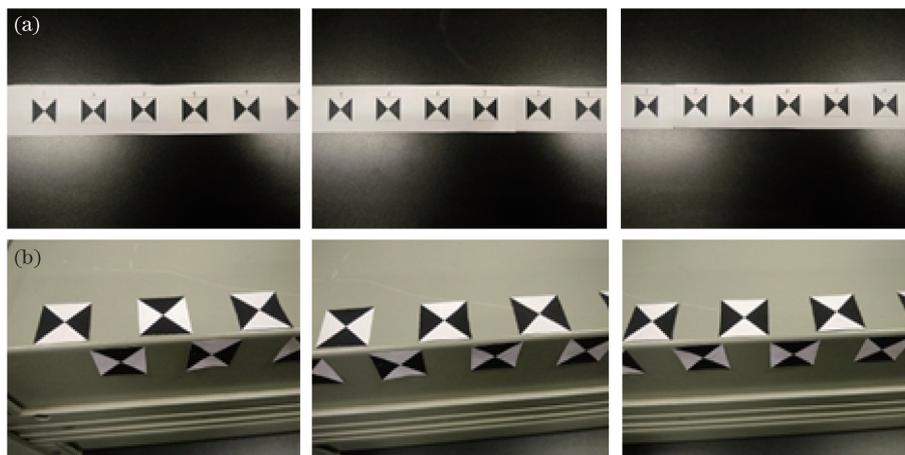


图 4 (a)传递像机和(b)测量像机采集的部分图像

Fig. 4 Some pictures taken by (a) relay camera and (b) measurement camera

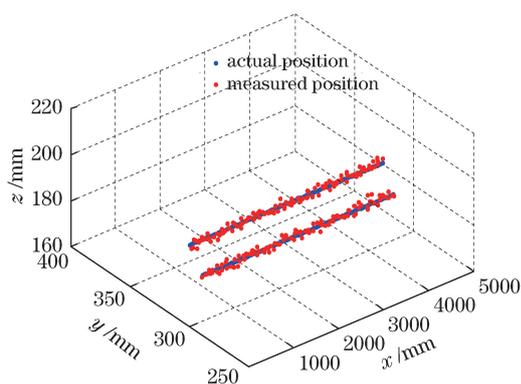


图 5 结构表面标识点位置的测量结果

Fig. 5 Measurement result of mark point positions on structure surface

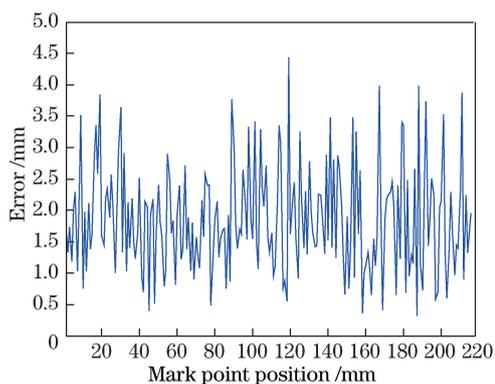


图 6 标识点测量位置误差

Fig. 6 Measurement position error of mark points

通过实验可以看出,在传递像机的辅助下,测量像机可以进行动态测量,从而解决了移动像机在测量过程中无法获取外参数的问题,同时各测量点的坐标位置也统一到了相同的世界坐标系中。经测量计算,得到均方根(RMS)误差为 2.012 mm,该测量像机的测量精度可以达到结构形变动态测量的要求。

#### 4.2 测量精度分析

由传统双目摄像测量原理可知,双目摄像测量精度与两像机的有效焦距、基线距等参数有关<sup>[12]</sup>。由传递像机的移动摄像测量原理可知,测量过程中相邻时刻不同位置的像机可构成等效的双目摄像测量系统。摄像测量精度与移动过程中的平台运动速度  $v$  和图像采集帧频  $f$  有关,为了考察这两个参数对最终测量精度的影响,仍利用上述实验系统并采用控制变量法对测量精度进行比较分析。

为了确保在测量过程中形成等效的双目测量,必须保证每个待测量标识点在测量像机采集的多幅图像中至少出现 2 次。在此原则下,调节平台的运动速度,当帧频为 3 frame/s 时,测量结果如图 7 所示,横坐标对应平台的运动速度,纵坐标为 215 个测量点的 RMS 误差。当控制平台的运动速度为 20 mm/s、调节帧频大于 0.4 frame/s 时,测量结果如图 8 所示,横坐标为帧频。

由图 7、8 的测量精度对比实验可以看出,平台运动速度和帧频对测量误差均有一定的影响。图 7 表明此实验系统中平台运动速度超过 120 mm/s 后,误差明显增大,而速度过小对测量误差也有影响,但是影响程度较小。图 8 表明帧频对测量误差的影响较为明显,帧频与测量误差基本呈线性关系;当帧频增加到一定程度,测量精度保持稳定,这是由像机的分辨率导致的。因此,在移动式测量过程中,应综合考虑平台运动速度与帧频对测量误差的影响,但同时也应避免平台运动速度过慢以及采集频率过大的极端现象,因为这会导致计算量过大。

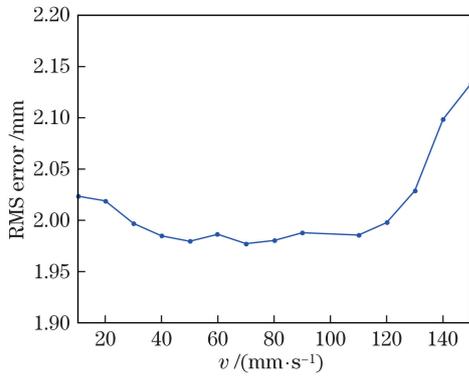


图 7 平台运动速度对 RMS 误差的影响

Fig. 7 Relationship between platform movement speed and RMS error

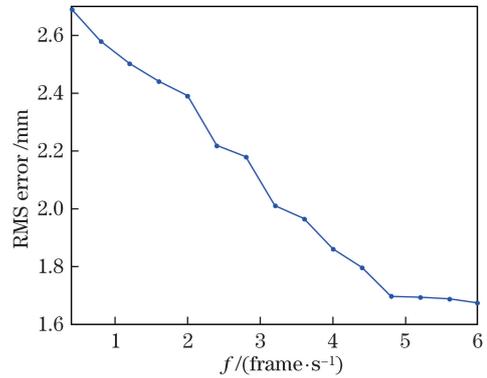


图 8 帧频对 RMS 误差的影响

Fig. 8 Relationship between frame frequency and RMS error

## 5 结 论

在测量大型结构表面的特征点时,采用移动摄像测量方法可以充分根据像机在相邻时刻的位置建立等效的双目摄像测量系统,从而利用较少的图像采集点对大型结构进行全局测量。然而在移动过程中,测量像机的外参数会随着平台的运动而不断变化,外参数的不确定性给移动摄像测量方法的应用和推广带来一定的困难。本文方法借助传递像机外参数向平台运动参数的不断转化,并充分利用测量像机与运动平台固连的隐含信息,推导出测量像机的实时外参数,从而使移动摄像测量的精度得以保证,极大地提高了移动摄像测量的自动化程度。本文方法在一定程度上拓宽了摄像测量的应用领域,可应用于铁路轨道变形、边坡变形等大视野场合的在线监测,而且所需图像采集装置数量较少。

## 参 考 文 献

- [1] Xie Zexiao, Chen Wenzhu, Chi Shukai, *et al.* Industrial robot positioning system based on the guidance of the structured-light vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1015001.  
解则晓, 陈文柱, 迟书凯, 等. 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1015001.
- [2] Fu Sihua, Yu Qifeng, Wang Mingzhi, *et al.* Railway geometric parameters measurement system based on videometrics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3203-3208.  
伏思华, 于起峰, 王明志, 等. 基于摄像测量原理的轨道几何参数测量系统[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3203-3208.
- [3] He Feiyan, Lin Jiarui, Gao Yang, *et al.* A new system combining monocular vision with inclinometer sensors for pose measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1215002.  
何斐彦, 林嘉睿, 高扬, 等. 单目视觉与倾角仪组合优化的位姿测量系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1215002.
- [4] Dai Dongkai, Wang Kingshu, Hu Chunsheng, *et al.* Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0312005.  
戴东凯, 王省书, 胡春生, 等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0312005.
- [5] Yuan Yun. Research on networked videometrics for the shape and deformation of large-scale structure[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 23-42.  
苑云. 大型结构形变的组网摄像测量研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 23-42.
- [6] Sun Changku, You Qiang, Lu Rongsheng, *et al.* On-line measurement of seamless steel pipe straightness by laser vision[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, 23(3): 174-177.  
孙长库, 尤强, 卢荣胜, 等. 无缝钢管直线度激光视觉在线测量[J]. *计量学报*, 2002, 23(3): 174-177.
- [7] Xie Guanghui, Sun Junhua, Yang Zhen, *et al.* 3D data registration method for vision measurement[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(7): 877-881.  
谢光辉, 孙军华, 杨珍, 等. 一种自由曲面视觉测量三维数据拼接方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(7): 877-881.
- [8] Zhang Hongtao, Duan Fajie, Wang Xueying, *et al.* Technique of unifying the coordinates of multi-sensor visual measuring system[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(4): 1301-1304.  
张洪涛, 段发阶, 王学影, 等. 多传感器视觉测量系统坐标统一技术研究[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(4): 1301-1304.

- [9] Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Jiang Guangwen, *et al.* Relay camera videometrics based conversion method for unstable platform to static reference[J]. *Science China*, 2011, 41(5): 681-686.  
于起峰, 孙祥一, 姜广文, 等. 基于传递像机摄像测量的不稳定平台的静态基准转换方法[J]. *中国科学*, 2011, 41(5): 681-686.
- [10] Li Dong, Zhang Maoqing. Machine vision pixel calibration[J]. *Artificial Intelligence Research*, 2014(3): 25-33.
- [11] Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and research[M]. Beijing: Science Press, 2009: 71-77.  
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: 71-77.
- [12] Zhang Guangjun. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008: 137-140.  
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 137-140.