

引用格式:陈彭鑫,仲思东,刘宇轩.单目六自由度形变监测方法与系统[J].电光与控制,2018,25(10):94-99. CHEN P X, ZHONG S D, LIU Y X. A monocular vision based six-DOF deformation monitoring method and its system[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(10):94-99.

单目六自由度形变监测方法与系统

陈彭鑫^a, 仲思东^{a,b}, 刘宇轩^a

(武汉大学 a. 电子信息学院; b. 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 为了利用单目视觉实现空间六自由度的形变监测方法,研究基于方向预估的圆对跟踪算法、基于分水岭的轮廓提取算法和遮挡判别方法,设计并研制了基于嵌入式平台的监测系统。系统包括靶标模块、视觉采集模块、中央处理模块和结果显示接口。靶标平面上包含5对等大的白色圆形标记,将靶标固定在待测物体的外表面上,通过跟踪各圆对的相对位置,解算待测物体在空间笛卡尔直角坐标系下的位移和旋转角。

关键词: 单目视觉; 六自由度; 形变监测; 方向预估; 分水岭算法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.10.019

A Monocular Vision Based Six-DOF Deformation Monitoring Method and Its System

CHEN Peng-xin^a, ZHONG Si-dong^{a,b}, LIU Yu-xuan^a

(Wuhan University, a. School of Electronic Information; b. National Key Laboratory of Surveying and Mapping of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to monitor the six-DOF deformation via monocular vision, a circle-pair tracking algorithm based on direction-prediction, a contour extraction algorithm and an occlusion identification method based on watershed, were studied, and a monitoring system based on embedded platform was designed and developed. The system consists of a target module, a visual collecting module, a CPU module and the result display interfaces. There are 5 pairs of circular white marks of the same size on the target module, which fix the target on the outside surface of an object to be monitored. Through tracking the relative positions of the 5 pairs of marks, the displacements and rotation angles of the object to be monitored in Cartesian rectangular coordinate can be calculated.

Key words: monocular vision; six-DOF; deformation monitoring; direction-prediction; watershed algorithm

0 引言

形变指物体受到外力而产生伸缩、倾斜、弯曲等形状变化,广泛存在于现代建筑及自然地形中^[1-2],如桥梁、大坝、矿山和高层建筑因年久失修造成的下沉、倾斜等,地形因自然灾害造成的滑坡、岩崩、地震、地表沉降等范性形变^[3]。形变在一定范围内是可以存在的,称为安全范围。若形变超出安全范围,则会演变成事故或灾害,危及人身财产安全。因此,对现代建筑和自然地形的形变情况进行在线监测显得尤为重要。

随着现代科技的发展,目前已经产生了通过倾斜

仪^[4]、全站仪、三维激光扫描、双目视觉、雷达、光纤传感^[5]等进行形变监测的技术。其中,倾斜仪监测法需要在待测物体上选择监测点打孔,然后埋置测斜管^[6],缺点是随着时间的推移,作为基准的测斜管底部会有形变产生,影响测量结果^[7];全站仪可以对距离、角度、高差进行高精度测量^[8],但只能针对待测物表面有限的监测点,且价格昂贵,对遮挡敏感;三维激光扫描监测法需要首先获得点云数据,再进行拼接、滤波等后期处理^[9],缺乏实时性;双目视觉监测法使用两部相机同时采集图像数据,通过立体匹配对待测物进行跟踪和定位^[10],但系统相对复杂且计算量较大。此外,还有学者利用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术^[11]和SBAS技术^[12]进行地表沉降的形变监测,以及利用GPS信号与SAR信号融合技术^[13]提高形变测量的精度。

收稿日期:2017-11-08

修回日期:2018-03-04

基金项目:国家测绘地理信息公益性行业科研专项(201412015)

作者简介:陈彭鑫(1994—),男,江苏徐州人,硕士生,研究方向为精密检测技术和图像处理。

近景摄影测量技术^[14]是指对物距不大于 300 m 的目标摄取影像,并利用图像处理技术和靶标的先验信息测量目标物的尺寸、速度等信息。本文主要提出了一套完整的单目六自由度形变监测方案,通过单目视觉和近景摄影测量技术,研究位移量和旋转量的测量原理、基于方向预估的圆对跟踪算法、基于分水岭的轮廓提取算法和遮挡判别方法,研制出嵌入式形变监测系统并进行实际测量,同时解决了形变监测过程中的多自由度、实时性、便携性、遮挡敏感等技术问题。

1 系统结构与靶标设计

1.1 系统总体结构

单目六自由度形变监测系统由靶标、白色圆形标记、滤光片、光学透镜组、光阑、CCD 成像传感器、USB 线缆、中央处理单元、LVDS 信号接口和 HDMI 接口组成,如图 1 所示。其中:靶标平面上包含 5 对等大的白色圆形标记,靶标固定于待测物体的外表面上;滤光片采用带宽为 15 nm 的窄带滤光片,用以滤除瑞利散射和杂散光;光学透镜组用于聚焦,应根据待测物体的距离选择合适的焦距;光阑用于调整通光口径,间接调整成像质量;电荷耦合元件(CCD)将二维光学图像信号转化为一维视频信号输出;USB 线缆用于传输图像数据,以及为 CCD 成像传感器及其驱动电路供电;中央处理单元基于 ARM 微处理器,执行图像处理算法;LVDS 信号接口用于连接液晶触摸屏,HDMI 接口用于连接显示器,均用于显示测量结果。

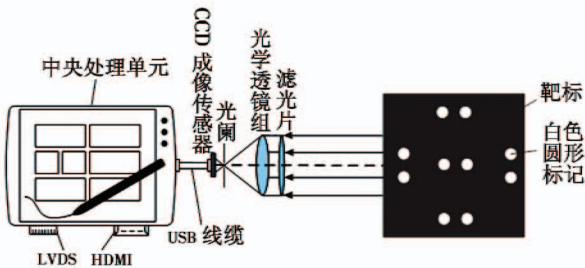


图 1 单目六自由度形变监测系统的构成

Fig.1 Diagram of six-DOF deformation monitoring system

1.2 靶标的设计

由于本文方法并非直接观测待测物体,而是通过观测附着在待测物体上的靶标来进行姿态解算,所以靶标设计的合理性是形变有效监测的前提条件。如图 2 所示,靶标为矩形薄硬板,其平面上共有 5 对半径为 10 mm 的圆形标记。为便于图像分割处理,提取标记轮廓,需要灰度差异较大的前景色与背景色,故将圆形标记设计为白色,靶标背景设计为黑色。

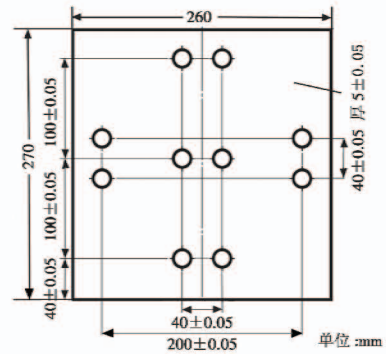


图 2 靶标尺寸图

Fig.2 Target size chart

2 六自由度的测量原理

2.1 坐标轴方向的设定

通过靶标的初始位姿确定坐标轴,规定坐标轴原点位于靶标中心, Z 轴与光轴重合且其正方向指向镜头光心, X 轴与中央圆对的圆心连线重合。 X, Y 和 Z 轴的正方向遵循右手定则,即右手 3 根手指互相垂直,大拇指指向 X 轴正方向,食指指向 Y 轴正方向,中指指向 Z 轴正方向。从而可以确定 X, Y 轴的方向。另外,规定旋转角 α, β 和 γ 的正方向遵循左手定则,即左手握住拳头,拇指指向旋转轴的正方向,四指弯曲的方向为旋转角的正方向。

2.2 测距原理

由高斯成像公式,根据三角形相似定理化简得

$$\begin{cases} u = f \cdot (1 + \frac{w}{w'}) \\ d = m \cdot n \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为焦距; w 为物高; w' 为像高; m 为像元尺寸; n 为成像的像素数。

系统通过跟踪靶标来计算物距,以初始帧为位置原点,则靶标在 Z 轴上的位移量 Δz 的算式为

$$\Delta z = u - u_0 \quad (2)$$

式中: u_0 为初始帧解算出的物距; u 为以后新帧解算出的物距。

2.3 平面内位移

图 3a 是靶标的平面位移示意图,当靶标在垂直于光轴的平面内移动时,用中央圆对的位移量表征靶标整体的位移。根据几何相似法^[15],因为中央圆对的位移量和圆心距的成像比例相同,所以,可以根据中央圆对的圆心距的先验信息来计算靶标在平面内的位移量为

$$\begin{cases} k = D/D_p \\ \Delta x = k \cdot \Delta x_p \\ \Delta y = k \cdot \Delta y_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: D 为实际圆心距; D_p 为像素圆心距; Δx 为实际水平位移量; Δx_p 为像素水平位移量; Δy 为实际垂直位移量; Δy_p 为像素垂直位移量。

2.4 绕 Z 轴旋转

Z 轴与光轴重合, 绕 Z 轴旋转即在垂直于光轴的平面内绕中央圆对旋转。图 3b 是绕 Z 轴旋转示意图, Δy_l 为左圆对的垂直位移量, Δy_r 为右圆对的垂直位移量, 二者均可通过式(3)计算得到。左圆对和右圆对的距离已知, 为 5 倍圆心距, 即 $5D$, 所以, 靶标绕 Z 轴的旋转角 γ 的算式为

$$\gamma = \arcsin \frac{\Delta y_l + \Delta y_r}{5D} \quad (4)$$

2.5 绕 X, Y 轴旋转

靶标绕 X 轴旋转时, 可以根据上、下圆对的像素圆心距计算旋转角。图 3c 是绕 X 轴旋转示意图, 靶标呈现“后仰”状态, 上圆对的像素圆心距变小, 下圆对的像素圆心距变大。图 3e 为面对 X 轴正方向的视图, $\Delta z_t, \Delta z_b$ 为上、下圆对在 Z 轴上的位移量, 上圆对和下圆对的距离已知, 为 5 倍圆心距, 即 $5D$, 再结合式(1)、式(2), 可求得靶标绕 X 轴的旋转角 α 为

$$\alpha = \arcsin \frac{\Delta z_t + \Delta z_b}{5D} = \arcsin \frac{u_t + u_b - 2u_0}{5D} = \arcsin \frac{f(\frac{1}{d_t} + \frac{1}{d_b} - \frac{2}{d_0})}{5} \quad (5)$$

式中: u_t, u_b 和 u_0 分别为上圆对、下圆对和中央圆对的物距; d_t, d_b 和 d_0 分别为上圆对、下圆对和中央圆对的像素圆心距。

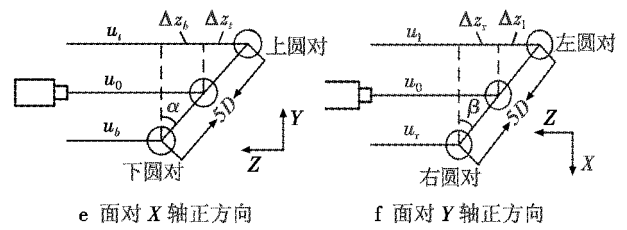
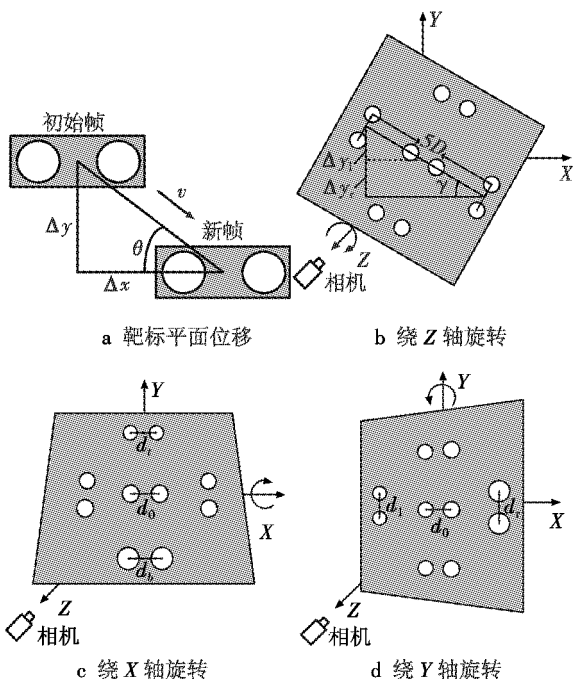


图3 六自由度形变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of six-DOF deformation

同理, 图 3d 是绕 Y 轴旋转示意图。靶标绕 Y 轴旋转时, 可以根据左、右圆对的像素圆心距计算旋转角。图 3f 为面对 Y 轴正方向的视图。靶标绕 Y 轴的旋转角 β 的算式为

$$\beta = \arcsin \frac{\Delta z_l + \Delta z_r}{5D} = \arcsin \frac{u_l + u_r - 2u_0}{5D} = \arcsin \frac{f(\frac{1}{d_l} + \frac{1}{d_r} - \frac{2}{d_0})}{5} \quad (6)$$

式中: $\Delta z_l, \Delta z_r$ 为左、右圆对在 Z 轴上的位移量; u_l, u_r 分别为左、右圆对的物距; d_l, d_r 分别为左、右圆对的像素圆心距。

综上, 通过组合 3 个位移量 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) 和 3 个旋转角 (α, β, γ) 即可实现空间 6 个自由度复杂姿态的解算。

3 数据处理算法

3.1 基于方向预估的圆对跟踪

建筑设施的形变具有一定的方向性和连续性, 通过分析相邻两帧图像, 可以计算出靶标做帧间运动的方向和速度, 从而预测形变的趋势。根据形变趋势预估下一帧中央圆对的所处区域, 并对该区域单独开窗搜索圆对轮廓。在图像分辨率较高的情况下, 开窗搜索可以缩减算法的计算量, 提高搜索效率。靶标做帧间运动的速度矢量 v 的算式为

$$v = f_{fps} \cdot (\vec{\Delta x}_{n,n+1} + \vec{\Delta y}_{n,n+1} + \vec{\Delta z}_{n,n+1}) \quad (7)$$

式中: $\vec{\Delta x}_{n,n+1}, \vec{\Delta y}_{n,n+1}$ 和 $\vec{\Delta z}_{n,n+1}$ 分别为靶标在空间 3 个直角坐标轴方向上的位移矢量; f_{fps} 为拍摄帧率。

3.2 基于分水岭算法的轮廓提取

基于标记的分水岭变换^[16]能很好地根据标记信息分割图像的同质区域, 且标记数决定最终得到的区域数。根据 3.1 节确定开窗区域之后, 利用分水岭算法分割该区域图像。如图 4a 所示, 在假设相邻两帧时间间隔内物体运动造成的位移小于圆形标记半径的前提下, 标记当前帧圆心位置为标记 1, 则标记 1 必位于下一帧的圆内; 标记矩形框整个边框为标记 2, 则标记 2 必与下一帧的圆相离。分水岭变换后, 矩形框中将仅

存在两个同质区域,其分界线为圆轮廓,分割得到的前景图像如图 4b 所示。对椭圆轮廓拟合后,更新圆心位置与圆心距,完成下一帧的跟踪。

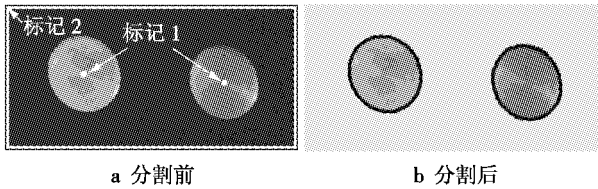


图 4 分水岭算法分割图像示意图

Fig. 4 Image segmentation with watershed algorithm

在有形变的情况下,实际提取到的是近似椭圆的轮廓。定义圆心位置为椭圆的质心,在 OpenCV 中,利用 moments 函数计算椭圆轮廓的零阶中心距 (mu_{00}) 和一阶中心距 (mu_{01}, mu_{10}),再根据式(8)求得轮廓的质心 (\bar{x}, \bar{y})。

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{mu_{10}}{mu_{00}} \\ \bar{y} = \frac{mu_{01}}{mu_{00}} \end{cases} \quad (8)$$

因为 \bar{x} 和 \bar{y} 是浮点数,所以更新的圆心位置也用浮点像素表示。最后,根据圆对的圆心位置计算其像素圆心距,即前文所述的 d_t, d_b, d_l, d_r 和 d_0 。

3.3 遮挡判别

以单目视觉为测量手段的系统往往需要良好的通视条件,遮挡物的存在会对测量效果产生一定的影响。如果没有相应的遮挡判别方法,甚至会产生错误的测量结果。本系统针对每帧的所有圆形标记,计算其轮廓内像素面积、灰度平均值、长短轴之比等三要素,并与前一帧的三要素数据做差,若差值超过一定的阈值,则判定有遮挡物存在,应丢弃该帧。换言之,通过分析相邻帧的相似程度进行遮挡判别,及时丢弃受遮挡影响的帧,避免错误测量结果的产生。

4 嵌入式系统设计

4.1 硬件电路设计

为了实现硬件设备的便携化,将单目六自由度形变监测方法用嵌入式系统实现。如图 5 所示,采用美国 NVIDIA 公司生产的以 ARM Cortex-A15 为架构的中央处理器 Tegra K1;同时使用具备 192 个可编程 CUDA 核心的移动图像处理单元(Kepler GPU),增强了系统的图像处理和图形渲染能力;EMMC Flash 用于烧写 Linux 系统,DDR3 SDRAM 作为系统运行内存;LVDS 接口和 HDMI 接口用于向显示设备输出帧图像和六自由度的测量结果。

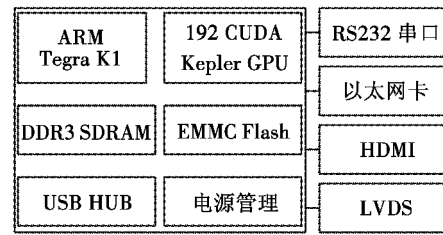


图 5 嵌入式系统结构框图

Fig. 5 Structure diagram of embedded system

4.2 监测系统的软件流程

单目六自由度形变监测系统的主程序流程如图 6 所示。首先,用户手动框选中央圆对,确定初始帧并开始监测;然后在“框选区域”内执行分水岭算法、提取中央圆对轮廓、计算出靶标的初始位姿以及用于遮挡判别的“三要素”,完成初始化操作。当新帧到来时,计算帧间运动的速度矢量,通过速度的大小和方向预估中央圆对所处的区域;对预估的区域做开窗处理,确定中央圆对的位置并搜索出其余 4 个圆对。最后进行遮挡判别,若存在遮挡,则丢弃该帧并重新接收新帧;否则,依次计算六自由度形变量,输出平滑滤波的测量结果。

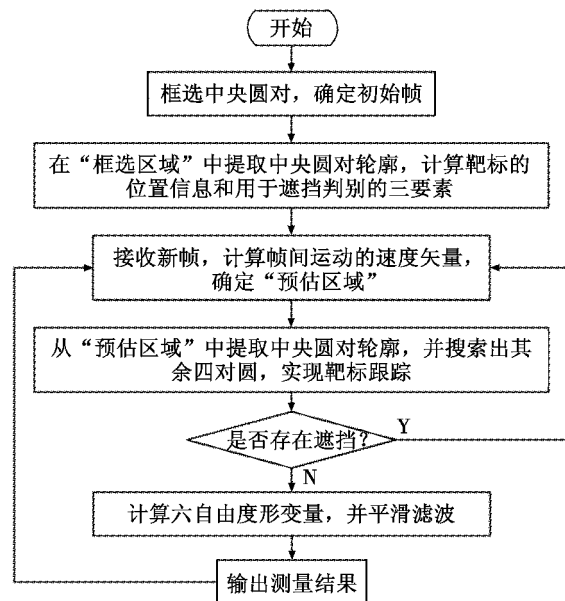


图 6 系统软件流程图

Fig. 6 Flow chart of the system's software

5 实验与精度分析

5.1 实验装置

实验装置包括图像采集处理装置和电移台装置。其中,图像采集处理装置如图 7a 所示,包括 CCD 工业相机(分辨率像素为 2592×1944 , 像元尺寸为 $1.9 \mu\text{m} \times 1.9 \mu\text{m}$),光学镜头(焦距为 12 mm),三脚架,ARM 单板

计算机和显示器;电移台装置如图 7b 所示,包括靶标板、传动丝杆、旋转台、步进电机、光栅尺和数显表。相机光轴重合于靶标板中垂线,电移台装置可以产生精度为 0.001 mm 的位移和精度为 0.001° 的旋转角,本实验以数显表的显示数值为约定真值。

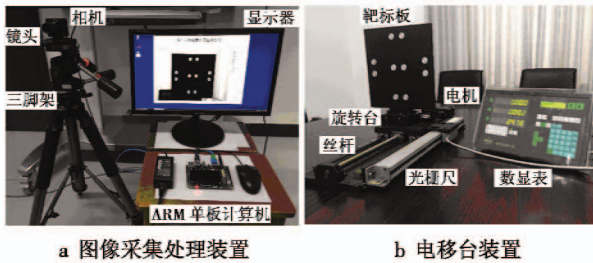


图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental devices

5.2 最高像素分辨率的推导

像素级误差是图像处理的主要误差来源,需要在设定靶标尺寸、镜头焦距、CCD 分辨率、测量距离时,推导出图像中 1 个像素的误差所引起的实际测量误差,这个误差可以用像素分辨率来表征。

首先,设定下列参数符号: W 为 X 轴方向的视场尺寸; H 为 Y 轴方向的视场尺寸; L 为测量距离; X 轴方向的 CCD 像素总数 p_x 为 2592; Y 轴方向的 CCD 像素总数 p_y 为 1944;镜头焦距 f 为 12 mm;像元尺寸 m 为 1.9 μm (长宽相等)。

最高像素分辨率是指:相机视场能以最小尺寸包含 5 对圆心位置时,1 个像素所对应的实际测量值。由 1.2 节中靶标的尺寸和 4:3 的 CCD 分辨率可知,此时的视场范围 ($W \times H$) 为 267 mm \times 200 mm,测量距离 $L = \frac{H \cdot f}{1944 \cdot m} = 650$ mm。由于在实际测量中需要留有形变空间,所以视场必定大于 267 mm \times 200 mm,实际像素分辨率要低于最高像素分辨率。各自由度最高像素分辨率如下。

1) X 轴方向最高像素分辨率 $\delta_x = \frac{W}{p_x} = \frac{267}{2592} = 0.103$ mm。

2) Y 轴方向最高像素分辨率 $\delta_y = \frac{H}{p_y} = \frac{200}{1944} = 0.103$ mm。

3) 结合式(1), Z 轴方向最高像素分辨率 $\delta_z = \frac{H \cdot f}{(p_y - 1) \cdot m} - \frac{H \cdot f}{p_y \cdot m} = 0.334$ mm。

4) 结合式(4),绕 Z 轴旋转角度的像素分辨率 δ_γ 与当前角度 γ_0 相关, $\delta_\gamma = \arcsin \frac{5D \cdot \sin \gamma_0 + 2\delta_y}{5D} - \gamma_0$ 。其中: γ_0 越大, δ_γ 的值越大,即像素分辨率越低;当 $\gamma_0 =$

0° 时, δ_γ 取得最高像素分辨率 0.059°。

5) 结合式(5),绕 X 轴旋转角度的像素分辨率 δ_α 与当前角度 α_0 相关, $\delta_\alpha = \arcsin \frac{5D \cdot \sin \alpha_0 + 2\delta_x}{5D} - \alpha_0$ 。

其中: α_0 越大, δ_α 的值越大,即像素分辨率越低;当 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时, δ_α 取得最高像素分辨率 0.191°。

6) 结合式(6),绕 Y 轴旋转角度的像素分辨率 δ_β 与当前角度 β_0 相关, $\delta_\beta = \arcsin \frac{5D \cdot \sin \beta_0 + 2\delta_z}{5D} - \beta_0$ 。

其中: β_0 越大, δ_β 的值越大,即像素分辨率越低;当 $\beta_0 = 0^\circ$ 时, δ_β 取得最高像素分辨率 0.191°。

5.3 实际测量结果与误差分析

为保证测量精度,本实验限定的有效行程范围为 $\Delta z \leq 10$ mm, $|\alpha|, |\beta|, |\gamma| \leq 5^\circ$,在 X, Y 和 Z 轴位移都为 10 mm 时进行 10 组实验,实验结果见表 1,用于验证本系统的位移测量精度;在绕 X, Y 和 Z 轴的旋转角都为 5° 时进行 10 组实验,实验结果见表 2,用于验证本系统的旋转角测量精度。

由表 1 和表 2 可知, X, Y 和 Z 轴方向位移测量实验的最大绝对误差分别是 0.16 mm, 0.17 mm 和 0.39 mm;绕 X, Y 和 Z 轴旋转角度测量实验的最大绝对误差分别是 0.28°, 0.30° 和 0.11°。值得注意的是,沿 Z 轴平移量 (Δz) 和绕 3 轴旋转角 (α, β, γ) 的像素级误差与焦距 f 、测量距离 L 、像元尺寸 m 、当前旋转角 ($\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$) 有关。减小误差的途径包括提高 CCD 分辨率、降低焦距 f (但应保证测量距离 L 也相应减少)、增大像元尺寸 m 等。在六自由度形变测量方面,传统或权威的方法是通过双目视觉^[17]进行立体匹配获得各特征点的三维坐标,从而具备更高的测量精度,但硬件结构和算法相对复杂。本方法相比双目视觉而言,在达到良好测量精度的同时,加快了测量速度、降低了硬件成本、提高了视场调节的灵活性,具有更多的应用场合。

表 1 位移量测量结果

Table 1 Displacement measurement results mm

实验编号	X 轴位移	绝对误差	Y 轴位移	绝对误差	Z 轴位移	绝对误差
1	9.96	-0.04	9.91	-0.09	10.04	0.04
2	10.11	0.11	10.11	0.11	10.02	0.02
3	10.01	0.01	9.83	-0.17	9.79	-0.21
4	9.95	-0.05	10.15	0.15	9.99	-0.01
5	10.16	0.16	10.08	0.08	10.10	0.10
6	10.14	0.14	10.00	0.00	10.14	0.14
7	10.02	0.02	10.03	0.03	9.92	-0.08
8	10.04	0.04	9.91	-0.09	9.89	-0.11
9	10.03	0.03	9.99	-0.01	10.39	0.39
10	9.89	-0.11	10.17	0.17	9.63	-0.37

注:约定真值为 10.00 mm。

表 2 旋转角度测量结果

Table 2 Rotation angle measurement results (°)

实验编号	绕 X 轴旋转	绝对误差	绕 Y 轴旋转	绝对误差	绕 Z 轴旋转	绝对误差
1	5.26	0.26	5.12	0.12	5.01	0.01
2	5.28	0.28	5.09	0.09	5.09	0.09
3	5.20	0.20	5.30	0.30	5.04	0.04
4	4.73	-0.27	4.80	-0.20	5.02	0.02
5	4.84	-0.16	5.14	0.14	5.07	0.07
6	4.89	-0.11	4.82	-0.18	5.08	0.08
7	5.12	0.12	4.74	-0.26	5.11	0.11
8	4.75	-0.25	5.07	0.07	4.89	-0.11
9	5.15	0.15	4.97	-0.03	5.08	0.08
10	4.73	-0.27	4.97	-0.03	5.02	0.02

注:约定真值为 5.00°。

6 结束语

本文设计了一种由光、机、电、计算设备一体化组成的软硬件兼备的单目六自由度形变监测系统,为桥梁、大坝、边坡等现代建筑和自然地形的形变提供了一种新型的在线监测方法。设计了包含 5 对圆形标记的靶标,通过跟踪圆形标记来计算空间三轴的位移量和旋转角。在数据处理方面,通过靶标做帧间运动的速度矢量来预估其下一帧中央圆对所在的区域;通过分水岭算法在开窗区域提取圆形标记的轮廓,并进行遮挡判别,避免产生错误的测量结果。在位移量的测量精度方面, X, Y 轴方向的测量精度较高,可以达到 0.17 mm; Z 轴方向的测量精度可以达到 0.39 mm。在旋转角的测量精度方面,绕 Z 轴旋转的测量精度较高,可以达到 0.11°; 绕 X, Y 轴旋转的测量精度可以达到 0.30°。本文方法在图像拍摄与处理、靶标定位与跟踪上实现了自动化和便携化,通过单目视觉和靶标的先验信息,同时解决了多自由度、实时性、便携性、遮挡敏感等技术问题。

参考文献

- [1] CHAN Y K, CHU C Y. Ground based synthetic aperture radar for land deformation monitoring: preliminary result [C]//Progress in Electromagnetic Research Symposium, IEEE, 2016:2540-2542.
- [2] XING X M, WEN D B, YUAN Z H, et al. Highway deformation monitoring based on CRInSAR technique[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2016: 6018-6021.
- [3] 包欢. 大型建筑物实时形变监测系统理论及应用研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2009.
- [4] 陈开圣, 彭小平. 测斜仪在滑坡变形监测中的应用[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(1):39-41.
- [5] 朱萍玉, 冷元宝, 王少力, 等. 基于分布式光纤传感的堤坝形变监测系统设计[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 57-62.
- [6] 马水山, 张保军, 汤平. 钻孔测斜仪在滑坡体深部变形监测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996(s1):109-114.
- [7] 翟旭. 利用三维激光扫描技术的边坡形变监测方法研究[D]. 北京:中国地质大学, 2015.
- [8] 贺勇, 姜晨光, 崔专, 等. 电子全站仪矿区地表形变自动监测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(s2): 229-230.
- [9] ABELLÁN A, OPPIKOFER T, JABOYEDOFF M, et al. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2014, 39(1): 80-97.
- [10] WU Y, HUA Y S, CHAO X. The camera calibration of binocular vision measurement based on OpenCV[C]//International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer, IEEE, 2014: 1835-1839.
- [11] 张拴宏, 纪占胜. 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)在地面形变监测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1):112-117, 128.
- [12] 尹宏杰, 朱建军, 李志伟, 等. 基于 SBAS 的矿区形变监测研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(1):52-58.
- [13] BENEVIDES P, NICO G, CATALAO J, et al. Merging SAR interferometry and GPS tomography for high-resolution mapping of 3D tropospheric water vapour[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2015: 3607-3610.
- [14] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002.
- [15] 黄桂平, 李广云, 王保丰, 等. 单目视觉测量技术研究[J]. 计量学报, 2004, 25(4):314-317.
- [16] CHIEN S Y, HUANG Y W, CHEN L G. Predictive watershed: a fast watershed algorithm for video segmentation [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2003, 13(5):453-461.
- [17] 刘建伟, 梁晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):126-134.