

机器视觉在提升钢丝绳振动监测的研究与应用

黄帅 李军霞

提

升钢丝绳作为摩擦提升系统的关键部件之一，在提升过程中会受到各种载荷的耦合作用，从而引发持续振动，通过有效监测钢丝绳振动并进行故障报警，对提升系统智能化运行以及矿井安全高效运行有重要意义。

针对钢丝绳横向振动位移测量方法有接触式及非接触式。由于提升钢丝绳特殊的运动方式，国内外学者在直接测量振动方面的研究较少，寇保福等^[1]将加速度传感器固定在提升钢丝绳上，对运行过程中钢丝绳的振动数据进行了采集。在非接触测量绳索振动方面的研究，计算机视觉技术吸引了国内外许多学者，JI等^[2]采用光流法准确测量了管道和电缆的振动，基于商用相机拍摄图像上的光强变化，估算了电缆段的振动方向和大小，并得到了验证；KIM S等^[3]为了估算电缆的动态特性，使用数码摄像机远程测量了电缆振动数据；刘尧^[4]利用双目视觉技术监测提升钢丝绳横向振动，分别研究了正交双目与平行双目立体视觉在矿井提升钢丝绳横向振动监测的应用。

笔者使用了线结构光监测摩擦提升系统钢丝绳的横向振动，进行实时振动数据的监测与记录。线结构光测量技术在工业中有着广泛应用。线结构光测量仪器的光平面结构参数是制约其测量精度的重要因素之一，国内外学者提出了多种线结构光结构参数的标定方法，如使用球形体、圆柱体、圆环标定或特殊组合体，以及利用双目视觉进行辅助标定等。笔者使用快速简单的标定方法，在单目摄像头标定的基础上进一步对线结构光平面参数进行标定。

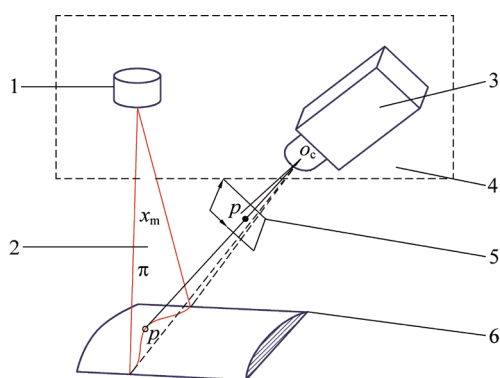
线结构光测量原理

线结构光法是由Peter M和Pennington S提出的一种应用于机器视觉领域的主动三角形测量法，被广泛用于工业检测。线结构光法测量原理如图1所示，成像系统包括线光源和工业CCD摄像机，线光源与摄像机具有相对固定的空间位置，当将线状结构的视觉传感器激光平面投影到要测量的工件表面上时，由于工件表面尺寸的变化，激光平面会产生变形光条，摄像机获取变形光条的图像，从中可以计算出工件表面的三维信息。

图1中 π 为线光源光平面， p 为光平面与被测物交线上一点，坐标系为测量坐标系，测量坐标系由相机坐标系旋转平移得到。相机成像的过程就是世界坐标系向图像坐标系转换的过程，物体在空间中的坐标即可转换为在图像中的像素坐标，但由于缺乏深度信息，二者尚不能确定对应关系。在实际应用线结构光测量模型时，首先将线光源光平面与提升钢丝绳的轴线垂直，光平面的参数为已知条件，根据相机成像原理以及线结构光测量原理，光平面与被测物体的交线的世界坐标就可以唯一确定。

光平面参数标定

将线状光源添加到系统中时，需要一个坐标系或方程式来描述光平面的位置。笔者基于张正友标定法，研究并使用一种快速准确标定光平面的方法，将标定摄像机与标定线光源光平面结合。标定线结构光测量仪器的步骤流程如图2所示。



1—结构光源；2—光平面；3—摄像头；4—线结构光测量系统；5—像平面；6—待测物体

图1 线结构光测量原理

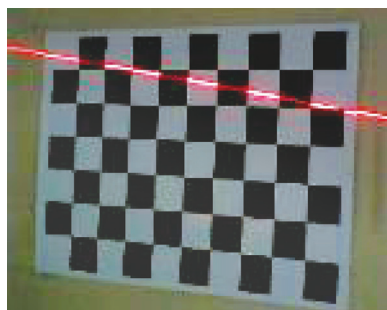
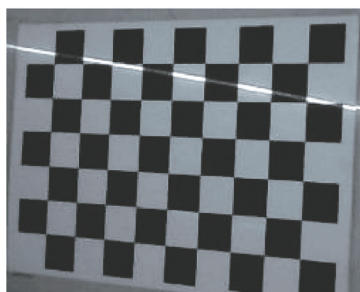


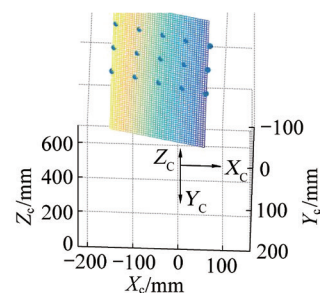
图3 棋盘格标定板图像



(a) 灰度处理图



(b) 提取光条交线

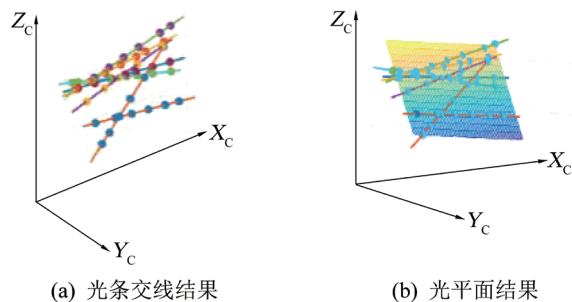


(c) 标定板空间位置

图4 棋盘格标定板图像处理结果

采用张正友标定法标定摄像机的同时，打开线状光源采集的棋盘格标定板图像，如图3所示。采用基于极值的灰度重心法获取标定板与光平面交线的单像素光条，标定板图像处理结果如图4所示。利用张正友标定原理及相机成像原理，将单像素光条转移到相机坐标系下， X_c 、 Y_c 、 Z_c 分别代表相机坐标系的横轴、纵轴、竖轴，如图5所示。光平面可以在相机坐标系下确定，此时光平面的空间位姿平面方程为

$$-0.036X_c + 0.933Y_c + 0.358Z_c - 173.791 = 0$$



(a) 光条交线结果

(b) 光平面结果

图5 标定结果

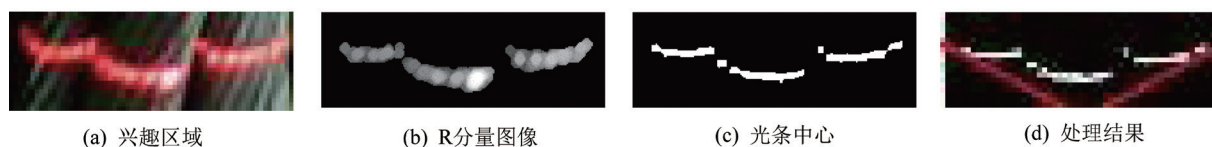


图6 振动位移测量原理

图像处理

为保证较高的位移数据获取频率和正确性,采用计算机视觉中的目标追踪,追踪相机镜头内照射在钢丝绳上的光条区域,然后获取得到钢丝绳的横向振动位移量。

追踪兴趣区域

线结构光测量钢丝绳的横向振动,当线状光线照射在钢丝绳横截面上,可以认为线状光条是在钢丝绳上的虚拟标记。使用核相关滤波法对包含线状光条的兴趣域进行实时追踪,目的是避免对整幅图像进行处理,提高程序监测数据的稳定性与准确性以及程序运行的实时性。

追踪兴趣区域图像包括训练阶段和快速检测,其中快速检测为在训练阶段由训练样本以及样本标签训练分类检测器,进而得到学习权重系数,由岭回归分类器可以得到测试样本的响应大小。读取视频流的下一帧,在上一帧图像内跟踪目标区域周围采样,计算图像内采样区域的响应值,响应值最大的区域即认为是目标追踪的兴趣区域。

振动位移测量原理

振动位移测量原理如图6所示,其中图6a是试验过程中一帧图片中的兴趣区域。

试验中所用的钢丝绳直径为38 mm,寻找提升钢丝绳的横截面中心可以认为是在光平面内找寻一个边长为38 mm的正方形中心,该正方形的4条边认为与在光平面上钢丝绳的横截面轮廓相切。考虑到振动位移计算算法的稳定性,拟寻找多个方位不同的正方形中心,所述正方形序列满足4条边相切

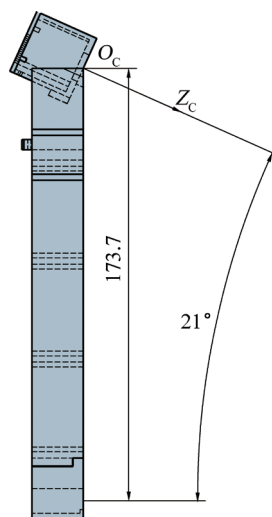


图7 线结构光测量三维模型侧视图

于钢丝绳横截面轮廓,且任意相邻2个正方形在光平面内偏转 15° 。

根据相机成像原理以及线结构光测量原理,结合标定线结构光测量仪器的结果,可求得此时正方形角点在相机坐标系下的空间三维坐标。钢丝绳横向振动位移量是在二维平面变化的,为了便于观察以及后续处理,将监测获得的位于相机坐标系下的监测点旋转平移到以光平面为 XOY 面的振动位移测量坐标系内。

标定与测量精度

标定结果分析

标定线结构光测量仪器采用波长为650 nm的“一”字线激光光源,线光源照射出的光平面垂直于光栅上的平行狭缝,将线光源的光栅平行于竖直方向安装在结构光测量仪器底部。图7中 O_cZ_c 为摄像机光轴,标定光平面结果见表1。



图8 钢丝绳段固定支架



图9 钢丝绳横向振动位移监测准确性试验场景

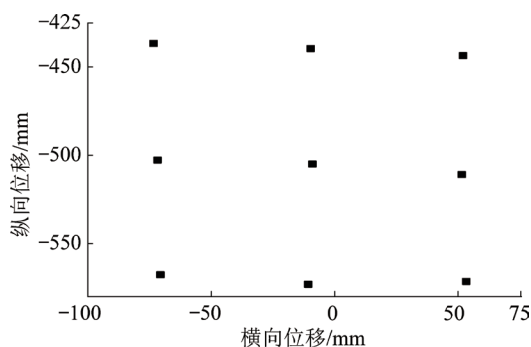


图10 钢丝绳横向振动位移监测测量结果位置

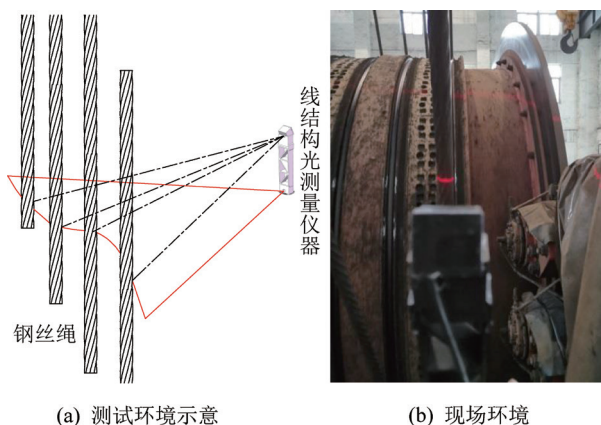


图11 测试环境示意及现场环境

表 1 标定光平面结果

项目	点与光平面的距离/mm	与光平面的夹角/(°)	光平面方程
仪器参数	173.70	21	$0.934Y_C + 0.358Z_C - 173.7 = 0$
标定结果	173.791	20.950	$-0.036X_C + 0.933Y_C + 0.358Z_C - 173.791 = 0$

注：点 O_C 与光平面的距离误差为0.052 4%； O_CZ_C 与光平面的夹角的误差为0.238 1%

测量精度分析

提升钢丝绳横向振动位移监测首先必须满足精度要求，为此笔者首先进行静态试验。亚克力板固定支架，保持亚克力板固定架与测量仪器位置不变，如图8所示，改变钢丝绳段在固定架上的位置，相邻钢丝绳放置孔的横向与纵向中心距均为60 mm。

提升钢丝绳横向位移监测准确性试验场景如图9

所示，经过分析测量结果位置如图10所示，由图10可知，平均误差为1.59 mm，均方误差为20.593 5 mm²。

工业性试验及结果分析

上述的标定与测量精度方法在江苏某矿进行了工业性试验，该煤矿使用的是落地式多摩擦提升

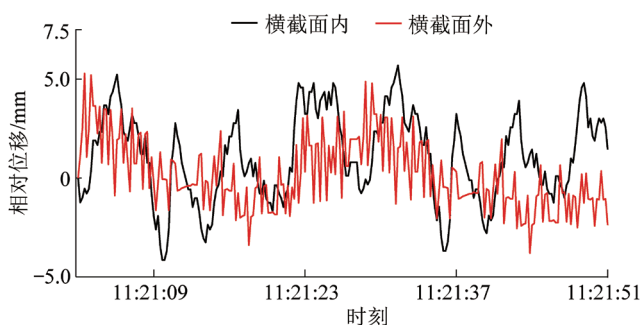


图12 江苏某矿现场钢丝绳振动监测结果数据

机, 采用了4根钢丝绳进行提升, 提升机技术参数如下:

提升机型号	JKMD-44(III)
提升高度/m	1 041.7
提升速度/(m·s ⁻¹)	10.89
主轴/天轮直径/m	4
提升绳长度/m	1 250
钢丝绳直径/mm	44
钢丝绳间距/mm	350

测试环境如图11所示, 线结构光监测仪器在远离司机室方向主轴上的一段提升钢丝绳进行横向振动位移监测。江苏某矿现场监测获得的振动数据如图12所示, 其中相对位移量指的是以起始位置为参考点, 后续监测数据相对于参考点的变化量, 定义4根钢丝绳轴线共面与光平面的交线为横截面内方向, 光平面内与横截面内方向垂直方向为横截面外方向; 在这段时间内, 横截面内、横截面外、横向振动的最大位移分别为5.689 5、5.280 3、5.886 1 mm。

结 论

1) 提出了基于线结构光法的钢丝绳横向振动位移测量方法。线结构光测量方法依靠摄像头捕捉线光源照射到钢丝绳表面的变形光条, 结合线光源光平面的结构参数来计算钢丝绳位置的三维信息。

2) 光平面参数是限制线结构光测量法精确程度的重要因素, 因此对线结构光法的标定方法进行了研究。在张正友标定法的基础上, 根据张氏标定法得到的每张标定板图像的位姿信息以及相机成像原理得到了每张标定板图像上光条交线在相机坐标系下的空间信息, 进一步分析得到了光平面参数。

3) 提出了使用计算机视觉目标追踪方法追踪包含光条交线的钢丝绳区域, 对区域图像进行图像处理得到了实时的钢丝绳横向振动位移数据, 并在江苏某矿进行现场应用试验。

■ 助理编辑: 李艾稣

作者简介:

第一作者: 黄帅, 博士研究生。

E-mail: 792192574@qq.com

作者单位: 太原理工大学机械与运载工程学院;

矿山流体控制国家地方联合工程实验室;

山西省矿山流体控制工程技术研究中心

基金项目: 山西省重点研发资助项目 (201903D121065);

国家重点研发计划重点专项资助项目

(2016YFC0600908)



参考文献

- [1] 寇保福, 刘邱祖, 刘春洋. 矿井柔性提升系统运行过程中钢丝绳横向振动的特性研究 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1194-1198.
- [2] JI Y F, CHANG C C. Nontarget image-based technique for small cable vibration measurement [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(1): 34-42.
- [3] KIM S, KIM N. Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing [J]. NDT & E International, 2013, 59(7): 25-33.
- [4] 刘 尧. 基于双目立体视觉的矿井提升绳横向振动检测研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.