

## 基于颜色分割的螺栓松动角度检测方法

康晶杰 张立君 孙远东 杨晓禹 王若兰 赵天豪

(中国兵器科学研究院宁波分院, 宁波 315103)

**摘要:** 为实现通过单帧图像对螺栓松动角度进行定量检测,设计了一种基于颜色分割和连通域特征处理的方法。首先,设计一种在Lab颜色空间下,对 $a$ 分量先后进行非线性拉伸、归一化及最优阈值分割的方法来分割表征螺栓松动角度的红色防松线图像;其次,利用开运算对图像进行形态学操作;然后,通过计算防松线图像中连通域的几何矩确定其方向向量;最后,通过四象限反正切函数确定螺栓松动角度。结果表明,检测算法能够实现通过单帧图像对螺栓松动角度进行精确测量,最大相对误差为1.80%,其精度满足工程实践需要,具有较强的工程应用价值。

**关键词:** 螺栓松动; 角度检测; 颜色分割; 连通域特征; 几何矩; 矢量运算

**中图分类号:** TP391.4; TU391 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.05.012

### 0 引言

作为典型的现代工业标准紧固件,螺栓在航空航天<sup>[1-2]</sup>、航海船舶<sup>[3]</sup>、陆战坦克<sup>[4]</sup>等多个领域起着至关重要的作用。但即使采用防松手段,大多数螺栓连接结构及服役中的机械振动或铸造材料的先天缺陷,仍会发生松动、疲劳断裂等失效情况,造成难以估量的损失<sup>[5-6]</sup>。为确保螺栓安全有效服役,定期检查和紧固工作尤为重要<sup>[7]</sup>。相较于传统的人工或接触式检查和修理方法,机器视觉的出现,为螺栓连接的可靠性自动检查提供了一种更先进和实用的解决方案。这种方法通过图像处理和分析来检查螺栓连接完整性的工作状态,具有非接触性、可追溯性,以及高度的智能化开发等优势<sup>[8]</sup>。目前,对于螺栓松动的视觉检测方法,主要包括传统的图像处理和深度学习两种方法。在传统图像处理领域,主流的方法是先利用霍夫圆检测<sup>[9-11]</sup>方法定位螺栓;然后,利用霍夫变换<sup>[12]</sup>算法检测螺栓松动前、后边缘直线的斜率变换,或结合Rammer算法<sup>[13-14]</sup>分割螺栓边缘轮廓,从而计算松动角度。在深度学习领域,主要方法是先利用一系列深度学习算法检测螺栓区域<sup>[15-18]</sup>;然后,通过基于光流的目标检测方法<sup>[19]</sup>、靶标法<sup>[20-21]</sup>、特征匹配法<sup>[22]</sup>等方法,检测螺栓松动前、后的差异,从而量化松动角度。

螺栓在多种应用场景中起着至关重要的作用,这使得基于深度学习的方法往往难以通过单一的识别模型实现对所有应用场景的螺栓进行准确的定位;另

外,基于传统图像处理的方法在处理复杂场景和不均匀光照的环境时,可能会产生误检,如常用的霍夫变换。区别于上述方法,有学者引入了一种基于颜色分割的方法,该方法受到人工目视检测螺栓的启发,通过在螺栓和基座上标记防松线,利用其相对于周围环境的颜色差异对其进行分割处理。此方法通过单帧图像获取螺栓服役时防松线位置信息,利用颜色空间中的防松线颜色特征,进行分割和后续处理,从而定性地判断螺栓的松动情况<sup>[23-27]</sup>。该方法的重要优势在于其主要依赖颜色特征和仅需处理防松线的特点,能够大幅降低处理全局图像边缘信息的螺栓整体形状特征识别时数据处理的复杂度。颜色特征的普遍性使该方法能适应不同场景和条件;同时,得益于防松线划线结构的特殊性,能通过单帧图像准确获取螺栓的松动角度,相较于需要比较螺栓松动前、后两帧图像的松动角度量化策略,显著降低了检测成本。因此,与前述的深度学习和传统图像处理方法相比,这种基于颜色特征的方法在计算成本和普适性上都具有显著优势。然而,尽管这种方法具有明显的优势,但在现有的研究中,学者们并未利用这种方法对螺栓松动角度进行定量研究。

针对上述问题,设计了一种基于防松线分割的螺栓松动角度检测方法。首先,采用一种基于Lab颜色空间的颜色分割技术,通过对 $a$ 分量先后进行非线性拉伸、归一化和最优阈值分割,实现红色防松线区域的准确分割;其次,通过对防松线进行开运算来优化

收稿日期: 2023-10-18 修回日期: 2023-11-15

基金项目: 宁波市自然科学基金项目(202003N4342)

作者简介: 康晶杰,男,1993年生,浙江宁波人,硕士,助理研究员; 主要研究方向为结构安全智能监测; E-mail:kangjingjie23@163.com。

引用格式: 康晶杰,张立君,孙远东,等. 基于颜色分割的螺栓松动角度检测方法[J]. 机械强度,2025,47(5):102-109.

KANG Jingjie, ZHANG Lijun, SUN Yuandong, et al. Bolt loosening angle detection method based on color segmentation [J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(5): 102-109.

分割区域;然后,利用防松线连通域的几何矩及防松线的特性来确定防松线的方向矢量;继而,计算两条防松线方向矢量的方向夹角;最后,利用试验算法验证螺栓松动角度检测的有效性。试验结果表明,提出的方法能够实现基于颜色分割和连通域特征对螺栓松动角度进行检测,检测精度符合工程要求。该方法的结构简单、实施难度较低,因此适合在工程实践中广泛应用。

## 1 角度检测方法

本文的研究场景如图 1 所示,在螺栓和基座上标画有红色防松标记线,通过螺栓上的转动防松线和基座上的固定防松线所呈现的角度来量化螺栓的松动角度。基于此研究场景,本文的方法概述如图 2 所示。图 1 研究场景中使用的螺栓为 304 不锈钢外六角螺栓,公称直径为 20 mm,螺纹间距为 2.5 mm,螺纹长度为 100 mm,头部高度为 12.33 mm,跨角宽度为 29.83 mm。螺栓符合国际标准 ISO 4017:2022 中的等级 B 标准尺寸要求。所提方法和后文所用的连接基盘为 160.15 mm×188.43 mm 长方形钢板。

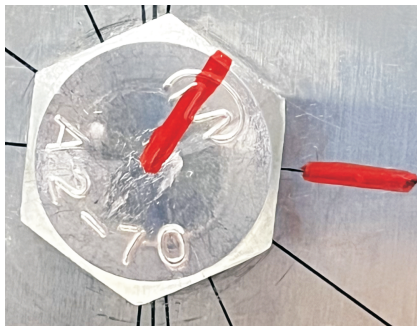


图 1 研究场景

Fig. 1 Research scenario

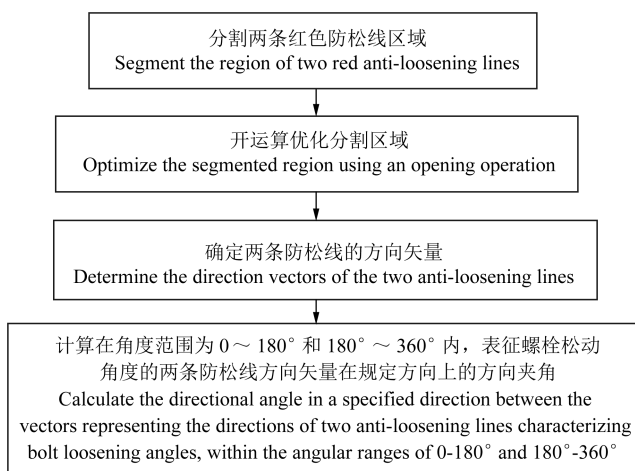


图 2 方法概述

Fig. 2 Method overview

首先,考虑到红色防松线标记相对背景具有明显的颜色特征,因此利用一种基于 Lab 颜色空间的颜色

分割技术,先后进行  $a$  分量非线性拉伸、归一化和最优阈值分割,以实现红色防松线区域的准确分割;其次,对分割得到的防松线图像进行开运算,在不改变防松线图像的前提下,去除无用连通域;然后,利用防松线连通域的几何矩和特性确定防松线的方向矢量;最后,利用四象限反正切函数和一个角度规则来计算两条防松线方向矢量在规定方向的方向夹角,从而测量螺栓在  $0^\circ \sim 180^\circ$  和  $180^\circ \sim 360^\circ$  范围内的松动角度。

该方法使用执行标准为 QB/T 4860—2015 的红色油漆笔,首先均匀连续地在已紧固的螺栓表面穿越其头部圆中心标画转动防松线,划线时注意应尽量平整,保证转动防松线连通域的几何矩计算精度;然后,在基座上,连续转动防松线方向标画固定防松线,划线时注意尽量平整且对齐转动防松线方向,保证固定防松线连通域的几何矩计算精度及减小原始误差。标画的线条粗细应保持整体均匀,保证防松线连通域的几何矩计算精度。线条色差保持大致相同,保证颜色分割算法的运算精度。

## 2 检测方法原理

### 2.1 基于颜色分割的防松线分割

#### 2.1.1 颜色空间转换

在图像处理中,图像通常采用 RGB 和 Lab 等颜色空间描述。其中以 RGB 颜色空间最为常用,RGB 颜色空间将图像分为 R(红色)、G(绿色)和 B(蓝色)3 个分量。3 个分量分别取值后混合,即得到了现实世界中的大部分颜色,常见于显示器中的图像显示。然而,针对防松线分割这类红色标记分割问题,Lab 颜色空间相对于 RGB 颜色空间具有更高的分量分离度和更好的抗光照干扰能力,更能符合人眼视觉感知,从而使得红色像素点的分割更为高效。Lab 颜色空间由  $L$ (亮度)分量、 $a$  和  $b$  两个颜色对立分量组成。由于 Lab 和 RGB 颜色空间无法直接转换,所以需要分两步,先将 RGB 颜色空间转换为 XYZ 过渡颜色空间,后转换为 Lab 空间模型<sup>[28]</sup>。

将 RGB 颜色空间转换为 XYZ 过渡颜色空间,转换过程如式(1)所示。 $M$  的取值参照国际标准 IEC 61966-2-1:2003<sup>[29]</sup>。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \\ M = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3567 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

然后,将 XYZ 过渡颜色空间转换为 Lab 颜色空间,

转换过程为

$$\begin{cases} L = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a = 500\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right] \\ b = 200\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right] \\ f(t) = \begin{cases} t^3, t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3}\left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29}, \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $X_n$ 、 $Y_n$  和  $Z_n$  分别为三原色 XYZ 在白光条件下的刺激值, 取值为

$$\begin{cases} X_n = 96.4221 \\ Y_n = 100 \\ Z_n = 82.5221 \end{cases} \quad (3)$$

在后续的图像分割中为了消除光照的影响, 可以利用 Lab 颜色空间的分量分离度高和  $a$  分量正轴代表像素点接近红色程度的特点, 仅将  $a$  分量作为研究对象。原图及其  $a$  分量如图 3 所示。由图 3 可以看出, 防松线区域相对非目标区域具有显著区别。



图 3 原图及原图的  $a$  分量

Fig. 3 Original image and the  $a$  component of the original image

### 2.1.2 在 $a$ 分量中分割防松线图像

为了增强红色像素点, 使得图像中的红色特征更容易被识别, 考虑使用非线性函数对  $a$  分量进行拉伸。拉伸的目标为突出红色像素点, 同时尽可能不影响其他像素点的颜色。拉伸后  $a$  分量为

$$a_{\text{new}}(i, j) = a(i, j)^{k_1} \quad (4)$$

式中,  $a(i, j)$  为拉伸前图像中像素点  $(i, j)$  的  $a$  分量值;  $a_{\text{new}}(i, j)$  为拉伸后图像中像素点  $(i, j)$  的  $a$  分量值;  $k_1$  为该非线性变换中的参数。

拉伸后的数据可能会有更大的变化范围, 进而影响后续的阈值分割效果。考虑使用归一化操作对数据进行预处理, 将数据转换到一个标准的尺度。归一化能减少由于非线性拉伸带来的异常值影响, 并提高阈值分割的稳定性, 降低阈值分割算法对图像的亮度或对比度的敏感度。归一化操作为

$$a_{\text{normalized}}(i, j) = \frac{a_{\text{new}}(i, j) - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (5)$$

式中,  $a_{\text{normalized}}(i, j)$  为归一化后图像中像素点  $(i, j)$  的  $a$  分量值;  $a_{\min}$  为  $a_{\text{new}}$  中的最小值;  $a_{\max}$  为  $a_{\text{new}}$  中的最大值。

对归一化后的  $a$  分量进行最优阈值分割<sup>[30]</sup>, 得到后续螺栓松动角度检测所需的防松线图像。选择参数  $k_1 = 3$ , 分割效果如图 4 所示。



图 4 防松线图像分割结果

Fig. 4 Segmentation result of the anti-loosening line image

### 2.2 形态学操作

图像在基于颜色空间分割后, 除目标防松线区域外, 存在第 2.1.2 节中的非目标区域连通域, 为使后续算法的顺利开展, 需要形态学操作来对其进行消除。使用形态学操作中的开运算对图像进行处理, 参考式 (6), 开运算使用结构元  $B$  对图像中的连通域集合  $A$  进行腐蚀, 接着使用  $B$  对腐蚀结果进行膨胀操作<sup>[31]</sup>。

$$A \circ B = (A \odot B) \oplus B \quad (6)$$

式中,  $\odot$  为形态学处理中的腐蚀操作;  $\oplus$  为形态学处理中的膨胀操作。

### 2.3 防松线连通域的方向矢量

考虑到图 4 中连通域的形状特征, 使用连通域的 0 阶与 1 阶原始矩计算连通域的质心  $(x', y')$ , 计算式为

$$\begin{cases} (x', y') = \left( \frac{M_{10}}{M_{00}}, \frac{M_{01}}{M_{00}} \right) \\ M_{00} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m I(i, j) \\ M_{10} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m iI(i, j) \\ M_{01} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m jI(i, j) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $m$ 、 $n$  分别为图像的行列数;  $I(i, j)$  为图像在位置  $(i, j)$  的值;  $M_{00}$  为连通域的 0 阶原始矩;  $M_{10}$ 、 $M_{01}$  为连通域的 1 阶原始矩。

然后, 使用连通域的 2 阶中心矩计算连通域相对图像中横轴的方向  $\theta$ , 计算式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\mu'_{11}}{\mu'_{20} - \mu'_{02}} \\ \mu'_{20} = \mu_{20}/\mu_{00} = M_{20}/M_{00} - x'^2 \\ \mu'_{02} = \mu_{02}/\mu_{00} = M_{02}/M_{00} - y'^2 \\ \mu'_{11} = \mu_{11}/\mu_{00} = M_{11}/M_{00} - x'y' \\ \mu_{00} = M_{00} \\ \mu_{11} = M_{11} - x'M_{01} \\ \mu_{20} = M_{20} - x'M_{10} \\ \mu_{02} = M_{02} - y'M_{01} \\ M_{02} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m j^2 I(i,j) \\ M_{20} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m i^2 I(i,j) \end{array} \right. \quad (8)$$

式中,  $\mu_{00}$ 、 $\mu_{11}$  分别为连通域的 0 阶和 1 阶中心距;  $\mu_{20}$ 、 $\mu_{02}$  为连通域的 2 阶中心矩;  $M_{02}$ 、 $M_{20}$  为连通域的 2 阶原始矩<sup>[32]</sup>;  $M_{11}$  为连通域的 1 阶原始矩。

鉴于螺栓松动方向的单一性,为了准确确定松动角度,必须正确区分图 4 中的两个连通域,明确它们分别代表转动防松线与固定防松线。在前面的步骤中,已经确定了各连通域的质心和方向,从而能够分别确定图中两个防松线所在的两条直线的方程以及它们的交点  $(x_0, y_0)$ 。观察图 4 可以发现,两直线的交点与转动防松线的质心的距离明显更短。因此,可以采用式(9)区分两个连通域。

$$\left\{ \begin{array}{l} D(k) = \sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2}, k = \{1, 2\} \\ \left[ \begin{array}{l} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \end{array} \right] = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \begin{array}{l} \frac{(x_1 - x_0, y_1 - y_0)}{D(1)} \\ \frac{(x_2 - x_0, y_2 - y_0)}{D(2)} \end{array} \right], D(1) < D(2) \\ \left[ \begin{array}{l} \frac{(x_2 - x_0, y_2 - y_0)}{D(2)} \\ \frac{(x_1 - x_0, y_1 - y_0)}{D(1)} \end{array} \right], \text{其他} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (9)$$

式中,  $D(k)$  为第  $k$  条防松线连通域与交点  $(x_0, y_0)$  的欧氏距离;  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$  分别为第 1 条和第 2 条防松线连通域的质心在图像中的坐标位置;  $\mathbf{e}_1$  为转动防松线连通域单位化后的方向矢量;  $\mathbf{e}_2$  为固定防松线连通域单位化后的方向矢量; 将识别得到的两个方向矢量画在图 1 上的示意图如图 5 所示。

图 5 中黄色箭头代表后续角度测量算法中的转动防松线及朝向,绿色箭头代表后续角度测量算法中的固定防松线及朝向。

#### 2.4 基于方向矢量处理的防松线夹角计算

在确定两条防松线的方向矢量后,计算两向量的点乘与叉乘,分别为

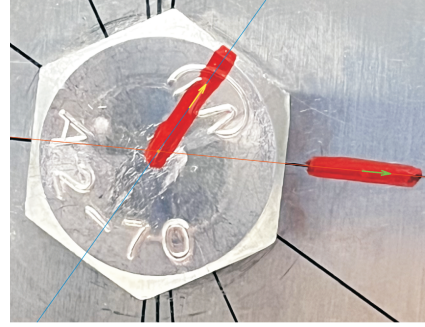


图 5 两防松线识别结果

Fig. 5 Identification results of two anti-loosening lines

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_1 = \|\mathbf{e}_2\| \|\mathbf{e}_1\| \cos \alpha \\ \mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_1 = \|\mathbf{e}_2\| \|\mathbf{e}_1\| \sin \alpha \end{array} \right. \quad (10)$$

式中,  $\alpha$  为向量  $\mathbf{e}_2$  到  $\mathbf{e}_1$  的夹角。结合式(10),由式(11)可获得螺栓松动的全角度:

$$\alpha = \arctan 2(\mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_1) \quad (11)$$

式中,  $\arctan 2$  (四象限反正切) 函数<sup>[33]</sup>可以返回 2 个数值的反正切,其值域为  $(-\pi, \pi]$ 。若函数解得的角度为正,角度值就在  $(0, \pi]$  范围内,表示逆时针方向;若函数解得的角度为负,角度值就在  $(-\pi, 0]$  范围内,表示顺时针方向。由于螺栓的松动方向为单方向,所以可设定逆时针为螺栓松动方向,若顺时针为松动方向,研究过程同理。由于逆时针螺栓松动的全角度为  $\theta \in (0, 2\pi]$ , 作如下调整:对式(11)所求的角度加上  $360^\circ$ , 并与  $360^\circ$  进行取模操作,使得所有松动角度均符合检测要求,如式(12)所示:

$$\alpha = \text{mod}(\alpha + 360, 360) \quad (12)$$

需要注意的是,当螺栓松动角度为  $180^\circ$  时,由于两条防松线所在的直线重合,则无法得到对应的松动角度。因此,本文中考虑检测的螺栓松动角度范围定义为  $\theta \in (0, \pi) \cup (\pi, 2\pi]$ 。

### 3 试验及结果分析

在本节中,将验证所提方法检测螺栓松动角度的正确性和精度,搭建试验平台如图 6 所示。在试验装置中的钢板表面固定用于螺栓角度检测精度验证的圆形尺,并用 M20 螺栓贯穿,实际应用中可将圆形尺去除。在圆形尺上画有红色固定防松线,在螺栓表面画有红色转动防松线。图像采集由某智能手机的自带相机完成,相机主要参数如表 1 所示,距离试验装置 25 cm;图像处理算法平台硬件环境为 Intel i7,内存为 32 GB,显卡为 NVIDIA Quadro T1000;软件环境为 Windows 11, Matlab R2019a。算法中选取的参数如表 2 所示。

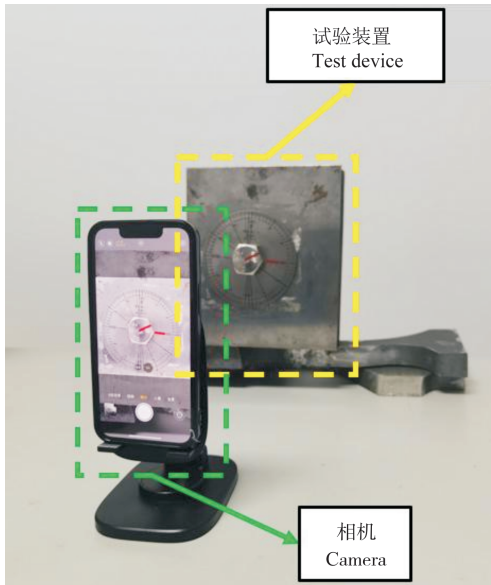


图6 试验平台

Fig. 6 Test platform

表1 相机参数

Tab. 1 Camera parameters

参数 Parameter	值 Value
光圈 Aperture	$f/1.6$
焦距 Focal length/mm	53
图像分辨率 Image resolution/(Pixels×Pixels)	3 024×3 024

表2 选取的参数

Tab. 2 Selected parameters

参数 Parameter	值 Value
非线性拉伸参数 $k_1$ Nonlinear stretch parameter $k_1$	3
结构元 $B$ 大小 Size of structuring element $B$	3×3

### 3.1 螺栓松动的全角度检测

为了确认螺栓松动角度检测的准确性,对螺栓松动的全角度进行定量测量,验证能否实现 $0^\circ\sim 360^\circ$ (除 $180^\circ$ )的螺栓松动角度的度量。螺栓全角度松动的检测试验验证结果如表3所示,角度测量的绝对误差如图7所示。试验结果表明,本方法能够检测螺栓 $0^\circ\sim 360^\circ$ (除 $180^\circ$ )的松动角度,最大测量绝对误差为 $0.38^\circ$ ,最大相对误差为 $1.00\%$ 。对于任意角度的检测结果误差均相对稳定,且符合实际工程误差标准,还具备较高的测量精度。对 $0^\circ\sim 30^\circ$ 松动角度的识别,绝对误差不超过 $0.3^\circ$ ,相对误差不超过 $1.00\%$ ,对螺栓早期松弛阶段同样具备较好的检测效果。此外,试验的全角度检测、相对角度受限检测在建立螺栓松动角度和预紧力损失关系<sup>[34]</sup>、无人机等自动巡检设备检测或定量拧紧螺栓<sup>[35]</sup>等诸多研究中起着极为重要的完善作用。

表3 螺栓松动全角度测量结果

Tab. 3 Measurement results of the full range of bolt loosening angles

实际角度 Actual angle/ $^\circ$	检测角度 Detection angle/ $^\circ$	绝对误差 Absolute error/ $^\circ$	相对误差 Relative error/%
5	5.02	0.02	0.40
10	10.08	0.08	0.80
30	30.30	0.30	1.00
60	59.84	0.16	0.27
120	120.15	0.15	0.13
150	149.73	0.27	0.18
240	240.10	0.10	0.04
300	299.93	0.07	0.02
350	350.38	0.38	0.11
360	359.84	0.16	0.04

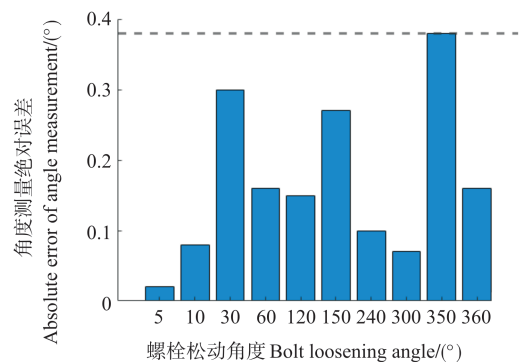


图7 角度测量结果绝对误差

Fig. 7 Absolute error of angle measurement results

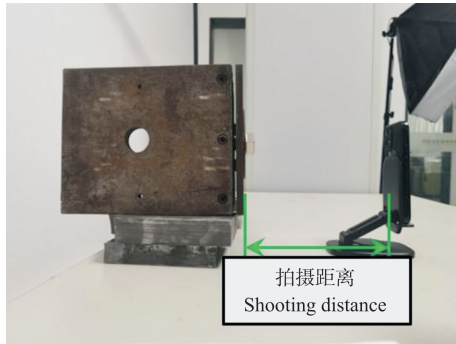
### 3.2 不同的拍照距离

由于相机与螺栓的距离在实际工程应用中可能会因环境和条件而变化,所以拍摄距离是一个不可忽略的因素。通过调整试验装置与相机距离,如图8所示,调整图8(a)中的拍摄距离,分别为近(20 cm)、中(35 cm)、远(50 cm),拍摄螺栓松动角度为 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 和 $30^\circ$ 的图像,如图8(b)~图8(d)所示。角度测量相应结果如表4所示,其中各组松动角度检测相对误差均相对稳定,最大相对误差为 $1.8\%$ 。不同拍摄距离角度测量的绝对误差如图9所示,其中最大角度测量绝对误差不超过 $0.1^\circ$ 。验证了算法对于不同距离检测螺栓松动角度的鲁棒性,可为自动巡检设备在不同距离精确检测螺栓松动角度奠定基础。

### 3.3 误差分析

检测误差主要源于以下几点:一是防松线的标画准确性:本文的核心方法是基于防松线的夹角来计算螺栓的松动角度;因此,手工标画防松线的方向精度对式(11)的计算结果至关重要,并最终影响检测角度的准确性。二是颜色分割算法的效果:本文采用的是一种全局的颜色分割方法,其对于防松线边缘颜色的识别可能不够精确;这种不精确性会进一步影响后续算法中连通域几何矩的计算。三是圆形尺测量的误差:

由于是通过圆形尺人工测量得到的螺栓实际松动角度作为检测结果的参照,这也可能带来一定的测量误差。



(a) 拍摄距离  
(a) Shooting distance



(b) 近 (b) Near  
(c) 中 (c) Medium  
(d) 远 (d) Far

图 8 调整拍摄距离获取距离为近、中和远的图像

Fig. 8 Adjusting shooting distance to obtain images at near, medium, and far distances

表 4 螺栓松动角度检测结果

Tab. 4 Measurement results of bolt loosening angles

拍摄距离 Shooting distance/cm	实际角度 Actual angle/(°)	检测角度 Detection angle/(°)	相对误差 Relative error/%
20	5	4.95	1.00
	10	9.95	0.50
	30	30.10	0.33
35	5	4.99	0.20
	10	10.09	0.90
	30	29.97	0.10
50	5	5.09	1.80
	10	9.93	0.70
	30	30.02	0.07

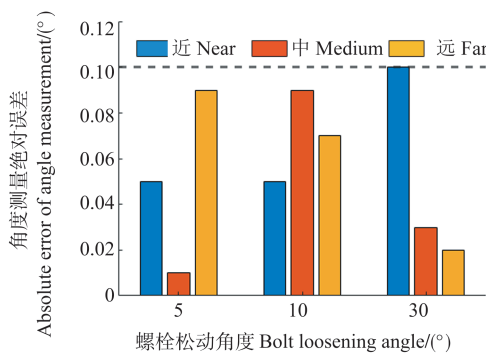


图 9 不同拍摄距离的角度测量结果绝对误差

Fig. 9 Absolute error of angle measurement results at different shooting distances

## 4 结论

通过设计基于颜色分割和连通域特征处理的方法,借助智能手机上的相机,实现了通过单帧图像对螺栓松动角度的定量检测,得出主要结论如下:

1)当采用 Lab 颜色空间对  $a$  分量进行非线性拉伸和归一化处理后,可以有效地增强红色防松线的分割效果,实现精确分割。

2)通过形态学开运算和几何矩计算,能够准确确定防松线的方向矢量,从而为后续松动角度的计算提供可靠依据。

3)试验表明,该方法在不同拍摄距离下对螺栓松动角度的检测精度相对稳定,最大相对误差为 1.80%,具有较高的工程应用价值,可应用于不同场景的螺栓松动检测。

## 参考文献 (References)

[1] 杨洋,刘文光,王晓婷,等. 静/动加载下单搭螺栓连接复合材料板的刚度变化规律[J]. 推进技术,2022,43(12):311-317.  
YANG Yang, LIU Wenguang, WANG Xiaoting, et al. Stiffness change law of single-lap bolted joint composite plates under static/dynamic loading [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43 (12): 311-317. (In Chinese)

[2] 叶耀坤,丁锋,李晓刚,等. 某航天器火工装置作动后壳体滞后裂纹机理研究[J]. 宇航总体技术,2022,6(5):40-48.  
YE Yaokun, DING Feng, LI Xiaogang, et al. Research on shell hysteresis crack of a pyrotechnics used on spacecraft [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2022, 6(5):40-48. (In Chinese)

[3] 王国亮,易小冬,谢清程,等. 调距桨叶根螺栓空泡损伤研究[J]. 船舶工程,2021,43(12):110-114.  
WANG Guoliang, YI Xiaodong, XIE Qingcheng, et al. Research about cavitation damage of CPP blade bolt [J]. Ship Engineering, 2021, 43(12): 110-114. (In Chinese)

[4] 唐云岗. 可分离铰接式坦克越壕性能仿真研究[D]. 长沙:中南大学,2009:58-67.  
TANG Yungang. Simulation study on trench crossing performance of separable articulated tank [D]. Changsha: Central South University, 2009:58-67. (In Chinese)

[5] 罗敏. 一起桥梁检测车事故原因分析[J]. 特种设备安全技术,2022(5):67-68.  
LUO Min. Cause analysis of an accident of bridge inspection vehicle [J]. Safety Technology of Special Equipment, 2022(5): 67-68. (In Chinese)

[6] 田静,崔萍,张远琴,等. 一起电动单梁起重机部件坠落伤人事故分析[J]. 西部特种设备,2022,5(4):63-66.  
TIAN Jing, CUI Ping, ZHANG Yuanqin, et al. Analysis of an electric single beam crane component falling injury accident [J]. West-

- ern Special Equipment, 2022, 5(4): 63-66. (In Chinese)
- [7] 彭凌云, 韩虎. 关于风电机组检修维护的要点讨论[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(6): 173-176.  
PENG Lingyun, HAN Hu. Discourse upon the key points of overhaul and maintenance of wind turbine[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2022, 35(6): 173-176. (In Chinese)
- [8] 管春玲, 周金龙, 卢俊业, 等. 列车检修停靠状态下底板螺栓缺陷自动检测研究[J]. 电子技术与软件工程, 2021(18): 81-82.  
GUAN Chunling, ZHOU Jinlong, LU Junye, et al. Research on automatic detection of bottom plate bolt defects under the condition of train maintenance and parking[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021(18): 81-82. (In Chinese)
- [9] PARK J H, KIM T H, LEE K S, et al. Novel bolt-loosening detection technique using image processing for bolt joints in steel bridges[C]//Proceedings of the 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15), August 25-29, 2015, Incheon, Korea. [S. l.]: International Association of Structural Engineering & Mechanics, 2015: 1-19.
- [10] PARK J H, HUYNH T C, CHOI S H, et al. Vision-based technique for bolt-loosening detection in wind turbine tower[J]. Wind and Structures, 2015, 21(6): 709-726.
- [11] CHA Y J, YOU K, CHOI W. Vision-based detection of loosened bolts using the Hough transform and support vector machines[J]. Automation in Construction, 2016, 71: 181-188.
- [12] NGUYEN T C, HUYNH T C, RYU J Y, et al. Bolt-loosening identification of bolt connections by vision image-based technique[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2016, 9804: 980413.
- [13] LIU Y, HUO L S, SONG G B. Automatic detection on the bolt loose based on digital image processing[C]//Proceedings of the 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental & Materials Research (Structures18), August 27-31, 2018, Songdo Convensia, Incheon, South Korea, 2018: 1-22.
- [14] 周靖, 刘煜, 霍林生. 基于机器视觉的螺栓松动旋转角度测量[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(4): 159-162.  
ZHOU Jing, LIU Yu, HUO Linsheng. Machine vision-based rotation angle measurement of bolt looseness[J]. Machine Design and Research, 2021, 37(4): 159-162. (In Chinese)
- [15] XIE Y X, SUN J H. On-line bolt-loosening detection method of key components of running trains using binocular vision[C]//LIDAR Imaging Detection and Target Recognition 2017. SPIE, 2017: 1060513.
- [16] ZHAO X F, ZHANG Y, WANG N N. Bolt loosening angle detection technology using deep learning[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(1): 2292.
- [17] RAMANA L, CHOI W, CHA Y J. Fully automated vision-based loosened bolt detection using the Viola-Jones algorithm[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(2): 422-434.
- [18] 陈健雄, 宁航. 基于YOLO v2与OTSU的中低速磁浮接触轨连接板螺钉松动识别[J]. 计算机与现代化, 2019(9): 118-121.  
CHEN Jianxiong, NING Hang. Connecting plate screw loosening recognition of medium and low speed maglev contact rail based on YOLO v2 and OTSU[J]. Computer and Modernization, 2019(9): 118-121. (In Chinese)
- [19] PAN X, YANG T Y. Image-based monitoring of bolt loosening through deep-learning-based integrated detection and tracking[J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(10): 1207-1222.
- [20] SUN Y, LI M, DONG R, et al. Vision-based detection of bolt loosening using YOLOv5[J]. Sensors, 2022, 22(14): 5184.
- [21] YU Y, LIU Y, CHEN J, et al. Detection method for bolted connection looseness at small angles of timber structures based on deep learning[J]. Sensors, 2021, 21(9): 3106.
- [22] GONG H, DENG X J, LIU J H, et al. Quantitative loosening detection of threaded fasteners using vision-based deep learning and geometric imaging theory[J]. Automation in Construction, 2022, 133: 104009.
- [23] 黄德青, 倪思杰, 秦娜. 一种基于防松线识别的列车螺栓松动检测方法: CN113469966A[P]. 2021-10-01.  
HUANG Deqing, NI Sijie, QIN Na. A method of loosening a trains based on anti-pine recognition: CN113469966A[P]. 2021-10-01. (In Chinese)
- [24] YANG M L, LUO L Z, TAO M L. Efficient rail repair machine based on image recognition technology[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1486(4): 042023.
- [25] SONG D Y, XU X, CUI X P, et al. Bolt looseness detection based on Canny edge detection algorithm[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2023: 7713.
- [26] YANG R, GUAN Z L, LU J, et al. Bolt looseness detection algorithm based on 2D color space extraction and 3D depth measurement[C]//2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). New York: IEEE, 2022: 491-497.
- [27] DENG X J, LIU J H, GONG H, et al. Detection of loosening angle for mark bolted joints with computer vision and geometric imaging[J]. Automation in Construction, 2022, 142: 104517.
- [28] ZHENG X, LEI Q Y, YAO R, et al. Image segmentation based on adaptive K-means algorithm[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2018, 2018: 68.
- [29] International Electrotechnical Commission. Multimedia systems and equipment-colour measurement and management-part 2-1: colour management-Default RGB colour space-sRGB: IEC 61966-2-1: 1999/AMD1: 2003 CSV[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2003: 9-10.
- [30] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems 'Man' and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [31] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. 4th ed. London: Pearson Group, 2018: 487-488.
- [32] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants[J].

- IEEE Transactions on Information Theory, 1962, 8(2): 179-187.
- [33] MathWorks. atan2-Four-quadrant inverse tangent [EB/OL]. [https://ww2.mathworks.cn/help/matlab/ref/atan2.html?s\\_tid=srchtitle\\_atan2\\_1](https://ww2.mathworks.cn/help/matlab/ref/atan2.html?s_tid=srchtitle_atan2_1).
- [34] 王前选,王锐锋,李虎,等. 轨道车辆螺栓松动量与预紧力视觉检测方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9):3511-3524.  
WANG Qianxuan, WANG Ruifeng, LI Hu, et al. Research on visual detection method of rail vehicle bolt looseness and pre-tightening force [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9):3511-3524. (In Chinese)
- [35] QI Y Z, LI P Z, XIONG B, et al. A two-step computer vision-based framework for bolt loosening detection and its implementation on a smartphone application[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(5):2048-2062.

## Bolt loosening angle detection method based on color segmentation

KANG Jingjie ZHANG Lijun SUN Yuandong YANG Xiaoyu WANG Ruolan ZHAO Tianhao

(Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China)

**Abstract:** To achieve quantitative detection of bolt loosening angles through single frame images, a method based on color segmentation and connected domain feature processing was designed. Firstly, a method for performing nonlinear stretching, normalization and optimal threshold segmentation on  $a$  component successively in the Lab color space was designed to segment and represent the red anti-loosening line image of the bolt loosening angle. Secondly, the morphological operations were performed on the image by using the open operation. Then, the orientation vector of the connected domain in the anti-loose line image was determined by computing the geometric moments. Finally, the bolt loosening angle was determined through the four-quadrant arctangent function. The results demonstrate that the precise measurement of the bolt loosening angle through a single frame image can be achieved by this detection algorithm, with a maximal relative error of 1.80%, its accuracy meets the needs of engineering practice and has strong engineering application value.

**Key words:** Bolt loosening; Angle detection; Color segmentation; Connected domain feature; Geometric moment; Vector calculation

Corresponding author: KANG Jingjie, E-mail: kangjingjie23@163.com

Fund: Ningbo Natural Science Foundation (202003N4342)

Received: 2023-10-18 Revised: 2023-11-15