

轨道扣件的图像采集与振动补偿方法

褚天舒, 郑树彬, 彭乐乐, 陈兴杰

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 基于车载图像采集系统进行轨道扣件检测是保障列车运行安全的一项关键技术, 受运行过程中低频机械振动和外界光照的影响, 常规的图像采集检测方法所得图像精度较低; 为了解决该问题, 提出一种基于机器视觉光源模型的振动补偿方法; 通过建立线阵相机、激光光源和扣件区域的照明模型消除外界光照的干扰, 并采用频域分析法和多传感数据融合技术, 设计补偿算法消除振动信息的干扰; 最后, 通过搭建采集平台进行实验验证, 结果表明该方法可以有效地减弱外界光照对成像质量的影响, 并对 $\pm 5^\circ$ 以内的图像偏移实现了修正; 与未采用机器视觉光源模型的方法相比, 扣件区域对比度提高10倍以上。

关键词: 扣件检测; 光源建模; 图像采集; 多传感数据融合; 振动补偿

Image Acquisition and Vibration Compensation Method of Track Fasteners

Chu Tianshu, Zheng Shubin, Peng Lele, Chen Xingjie

(School of Urban Mass Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Track fastener detection based on vehicle image acquisition system is a key technology to ensure train operation safety. However, due to the effect of low-frequency mechanical vibration and external light, routine acquisition and detection method usually gets poor-quality image. To solve this problem, a vibration compensation method based on machine vision system model was proposed. A lighting model composed of linear array camera, laser light source and fastener area were first set up to eliminate interference from external light. Combined with frequency domain analysis and multi-sensor data fusion technology, the compensation algorithm was designed to eliminate the interference of vibration information. In the end, an experimental platform was set up for verification. Results show that the above method can not only reduce external light effect, but also correct image offset that is within $\pm 5^\circ$. What's more, the contrast of the fastener area is more than 10 times higher than before.

Keywords: fastener detection; light source modeling; image acquisition; multi-sensor data fusion; vibration compensation

0 引言

轨道扣件是固定钢轨位置、阻止钢轨位移和防止钢轨倾翻的基础设施^[1], 列车的高速运行易造成扣件松动、断裂和缺失^[2], 直接影响到列车运行的安全性, 平稳性及舒适性^[3-4]。因此, 如何实现对轨道扣件的高效检测已成为维护列车安全运行的必要手段之一。

采用机器视觉的图像采集与处理技术, 通过线阵相机采集轨道扣件图像以检测该类故障, 成为现阶段的发展主流^[5-7]。在诸多影响因素中, 光源与振动成为影响图像质量的主要因素^[8]。光照条件欠缺将导致图像出现花点、过度曝光、阴影和照明不均匀等问题, 无规则的低频机械振动会导致图像的旋转、平移、模糊和畸变, 这都将对后续的图像处理造成极大的困难^[9]。在照明方面, 采用辅助光源主动照明的方式可以满足图像对光线的需求^[10], 但存在如何光源选择和如何快速调节光源的问题; 振动补偿方面, 目前常用的方法有: 激光传感器补偿法^[11-12]、计算机视觉补偿法^[13]以及基于面阵相机的振动补偿法^[14]等, 但以上方

法均为针对钢轨磨耗和接触轨相关参数进行研究, 能否直接应用于扣件图像采集还有待验证。

本文将针对光源和振动两方面存在的问题, 对轨道扣件图像的采集方法进行研究。根据相机的成像原理, 确定光源、相机和扣件区域之间的最佳位置关系, 对光源各参数的选取进行研究, 获得最佳的照明效果; 针对相机拍摄轨面所得图像, 通过惯性测量单元(IMU)对图像进行实时振动补偿, 提出了一种针对线阵相机的图像振动补偿方法, 获得无畸变、高清晰度的轨道扣件图像。

1 检测系统结构与分析

1.1 系统结构

图1给出了轨道扣件图像采集系统结构。该系统主要由线阵相机和IMU构成, 其中IMU包括加速度计和陀螺仪。为了采集高质量的轨道扣件图像, 对光源系统结构进行分析, 建立照明系统模型。使线阵相机与IMU同步采集, 建立振动补偿矩阵, 从而获取带有运动姿态信息的图像, 并完成振动补偿环节。

1.2 照明系统

图2给出了照明系统模型。相机与轨检车上的光源位于同一横截面, 当激光照射至扣件区域的上、下表面后反射至相机感光区域。设光源的宽度为 d , 扣件区域高度为 Δh , 光线的入射角为 θ , 光源中心点与扣件区域上表面的距

收稿日期:2018-06-25; 修回日期:2018-07-25。

基金项目:国家自然科学基金项目(51478258);上海市科委重点支撑项目(18030501300)。

作者简介:褚天舒(1994-),男,江苏苏州人,硕士研究生,主要从事轨道设备状态检测技术与理论方向的研究。

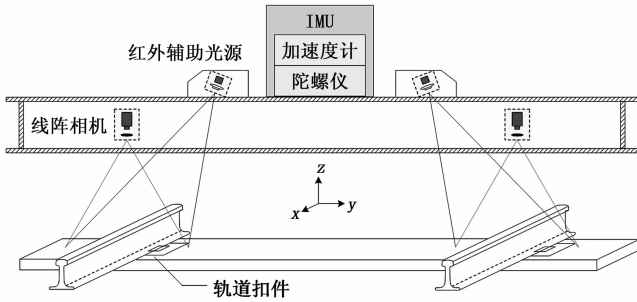


图 1 轨道扣件检测原理图

离为 H_g ，相机与扣件区域上表面的距离为 H_f ，光源中心点投影与相机中心点投影之间的距离为 l ，相机感光区域的直径为 D 。

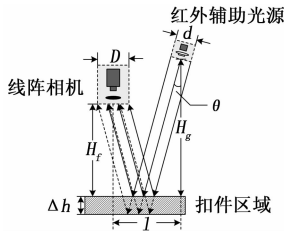


图 2 照明系统的理论模型

考虑到实际情况，上述参量中的 D 、 d 和 Δh 为不可变量，其他均为可调节量。由此可以得到各参数之间的关系：

$$D = \frac{d}{\cos\theta} + 2\Delta h \cdot \tan\theta \quad (1)$$

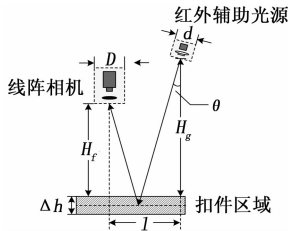


图 3 照明系统的点线简化模型

若将光源与相机抽象为一点，扣件区域抽象为线，可得图 3 所示的简化模型。此时各参数之间的关系为：

$$l = (H_g + H_f + \Delta h) \cdot \tan\theta \quad (2)$$

由 (1) 式可知， θ 的增加（减小）会导致 D 的增加（减小），因此当 D 、 d 和 Δh 不变时， θ 的值也将固定。通过 (2) 式可确定 l 、 H_g 与 H_f 三者之间的关系。

1.3 补偿系统

受到轨面不平顺的影响，车辆在运行过程中会接收来自各方向的冲激响应，造成无规则的振动，严重影响成像质量。通过 IMU 与线阵相机的刚性连接，实时采集车辆运动的振动信息，实现对图像的振动补偿。

1.3.1 平移补偿

平移振动分为 3 个方向：沿着钢轨方向的 x 方向、垂直钢轨方向的 y 方向以及垂直轨面的 z 方向，如图 4 所示。由于 x 向振动与车体运行方向一致，可看作车辆的正常位

移，因此只考虑 y 和 z 方向振动的影响。

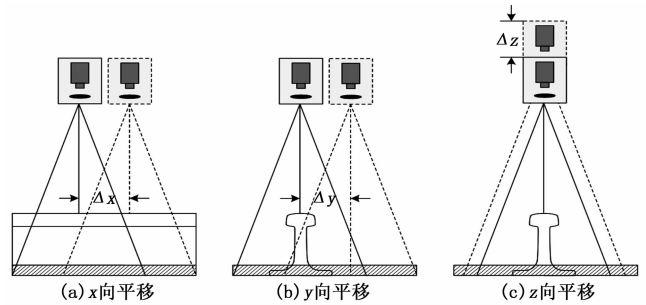


图 4 3 个方向的平移振动形式

y 向平移如图 4 (b) 所示。在该方向发生的振动会使相机的拍摄点偏离钢轨正中心，导致图像发生整体的左右平移。通过 IMU 可以计算出相机镜头的位移大小 Δy ，成像后的图像整体向相反方向平移的距离 d_y 为：

$$d_y = \frac{v}{u} \Delta y \quad (3)$$

其中： u 为相机与被拍摄物之间的距离（物距）， v 为相机镜头的焦距（像距）。

z 向平移如图 4 (c) 所示。该方向的振动会导致相机与扣件区域间的垂向距离改变，使图像产生缩放。缩放系数 k 为：

$$k = 1 + \frac{\Delta z}{u} \quad (4)$$

式中，当振动方向向上时， Δz 的取值为正，反之为负。

1.3.2 旋转补偿

与平移振动相同，旋转振动同样存在于 x 、 y 、 z 3 个方向。 x 向旋转如图 5 (a) 所示，若相机中心正对点的偏移距离为 $u \tan \Delta \alpha$ ，则图像整体向相反方向平移的距离 d_α 为：

$$d_\alpha = \frac{v}{u} \cdot u \tan \Delta \alpha = v \tan \Delta \alpha \quad (5)$$

式中，逆时针旋转时 $\Delta \alpha$ 取值为正，反之为负。

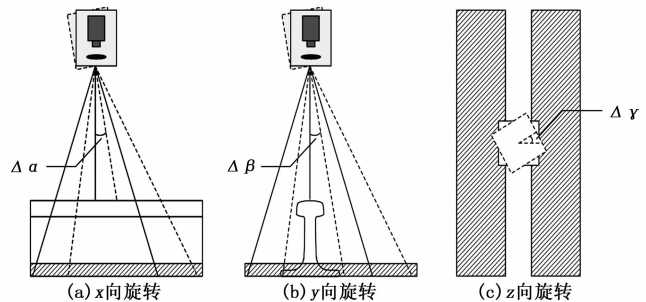


图 5 3 个方向的旋转振动形式

y 向旋转如图 5 (b) 所示。该方向的旋转会导致拍摄点偏离钢轨正中心。与 x 向旋转补偿类似，若相机中心正对点的偏移距离为 $u \tan \Delta \beta$ ，则图像整体向相反方向平移的距离 d_β 为：

$$d_\beta = \frac{v}{u} \cdot u \tan \Delta \beta = v \tan \Delta \beta \quad (6)$$

式中，逆时针旋转时 $\Delta \beta$ 取值为正，反之为负。

z 向旋转如图 5 (c) 所示。该方向的旋转会导致成像角度的偏转 (设为 $\Delta\gamma$)，则图像需反向补偿的角度 θ_z 为：

$$\theta_z = \Delta\gamma \quad (7)$$

综上，图像整体振动补偿的变换矩阵为：

$$P = kP_0 \begin{bmatrix} \cos(-\theta_z) & \sin(-\theta_z) & 0 \\ -\sin(-\theta_z) & \cos(-\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -d_\alpha & -d_\beta & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中： P_0 为原始图像像素点， P 为变换后的图像像素点。

2 数据采集与处理

2.1 数据采集

实验数据包括设备参数、图像以及运动姿态信息三大部分。设备参数主要是 H_g 、 D 等长度信息和 θ 角的角度信息，前者可通过游标卡尺和激光尺进行精确测量，后者可以根据距离信息经计算求得。设激光光源的垂直投影点与直射点间的距离为 l_0 ，则 H_g 、 l_0 和 θ 间的关系为：

$$\theta = \arctan \frac{l_0}{H_g} \quad (9)$$

图像信息以编码器外触发的方式，通过线阵相机进行采集。设置采样频率为 50 Hz，纵向分辨率为 2048px。运动姿态信息通过 IMU 进行采集，包含了 3 个方向的加速度与角加速度信息，结合频域分析法进行两次积分，可得到用于振动补偿的位移与角位移。

2.2 频域分析法

IMU 能够同时测得六个方向位置的加速度变化，包含 3 个加速度 (G_x 、 G_y 、 G_z) 和 3 个角加速度 (A_x 、 A_y 、 A_z)。对加速度信号进行积分变换求测点的位移和速度是振动信号处理中常用的方法，但时域上对加速度的积分会产生一个未知常量，如果在下次积分前无法准确估计和剔除常量所造成的误差，这些误差在第二次积分过程中将继续被放大为一次趋势项，同时产生一个新的未知常量，这将会大大影响测量结果的准确性。

频域分析法是一种通过傅里叶变换建立起频域与时域之间的联系，把动态信号变为以频率轴为坐标表示出来，在频域维度对信号进行分析，进而得到精确解^[15-17]的分析方法。设 $x(t) \leftrightarrow X(\omega)$ 为傅里叶变换的表达形式，依据傅里叶变换的积分定理，则有：

$$\int_0^t x(t) d(t) \leftrightarrow \frac{1}{j\omega} X(\omega) \quad (10)$$

根据以上原理，将速度或位移曲线中的趋势项去除^[18]，即可得满足要求的位移 (Δx 、 Δy 、 Δz) 和角位移 ($\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$)，同时在最大程度上减小了实验误差。

2.3 数据处理

2.3.1 IMU 数据处理

对于以 IMU 为核心的姿态信息采集模块，单独采用陀螺仪或加速度计都无法提供有效而可靠的信息。陀螺仪动态性能良好，可提供瞬间的动态角度变化，不受加速度变

化的影响，但受到积分过程的影响，存在累积漂移误差；加速度计表态响应好，可提供表态角度，但受动态加速度影响较大，不适合跟踪动态角度运动。因此，必须通过传感器数据融合的方法得到一个更优的值。

2.3.2 多传感数据融合

多传感数据融合是指对来自多个传感器的数据进行多级别、多方面、多层次的处理，以获得单一传感器所无法获得的有意义的新信息^[19-20]。对加速度计，采用低通滤波算法除去短时性快速变化的信号，保留长时性缓慢变化的信号，而对于陀螺仪则采用高通滤波方法来抑制积分的漂移。将这两种滤波方法相融合，组成一个互补滤波器，其原理为：

$$\begin{cases} \theta_k = \int_0^t \omega dt \\ \theta_f = k\theta_g + (1-k)\theta_a \end{cases} \quad (11)$$

其中： θ_f 为融合角度，即 3 个方向最终的角位移 ($\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$)， θ_g 为陀螺仪积分角度， θ_a 为加速度计角度， ω 为角速度， k 为陀螺仪权值。式 (11) 中 2 个滤波系数之和 1，因此所得 θ_f 的值是一个比较精确的线性估计值，有助于减小误差。

3 实验验证与结果分析

快速获得高质量的图像是支撑本文理论理论的基点，本文将对光源调节和振动补偿 2 个方面进行验证，并对所得图像质量进行评定。实验使用线阵相机 IMU 进行图像采集，如图 6 所示。相机和 IMU 的主要参数见表 1 和表 2。

表 1 线阵相机的主要参数

相机名称	分辨率	像素大小	最大线频率	镜头卡口
Linea GigE 4K	4096 * 1	7.04 * 7.04 μ m	80kHz	M42 * 1

表 2 IMU 的主要参数

指标	角速度	加速度
量程	$\pm 300^\circ$	$\pm 6g$
精度	$< 0.15^\circ/\text{sec}$	$< 5\text{mg}$
分辨率	$0.01^\circ/\text{sec}$	$< 1\text{mg}$

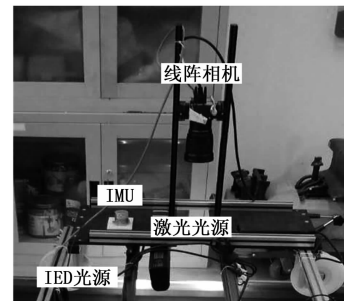


图 6 实验装置图

获得精确的实验数据是实验成功的基础，通过试验平台进行数据采集，采用频域分析法与多传感数据融合进行

处理, 可以获得满足要求的实验数据。

3.1 光源影响

进行光源影响验证实验, 将分别对 H_f 与 l 进行控制变量实验。实验参数与变量取值分别见表 3、4, 成像结果如图 7~8。

表 3 光源调节实验参数

		固定参数				可变参数(初值)		
参数	D/mm	d/mm	$\Delta h/mm$	$\theta/^\circ$	H_g/mm	H_f/mm	l/mm	
大小	36.5	20.0	85.0	5.5	335	650	103	

表 4 控制变量实验取值

实验序号	不变量	变量取值/mm
1	H_g, l	$H_f = 600$
		$H_f = 650$
		$H_f = 700$
2	H_g, H_f	$l = 98$
		$l = 103$
		$l = 108$

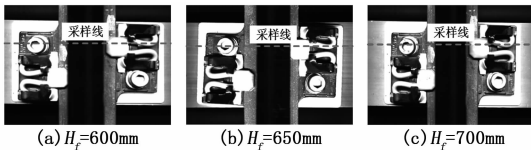


图 7 改变 H_f 的成像效果图

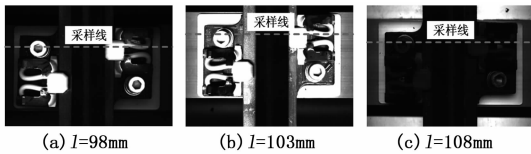
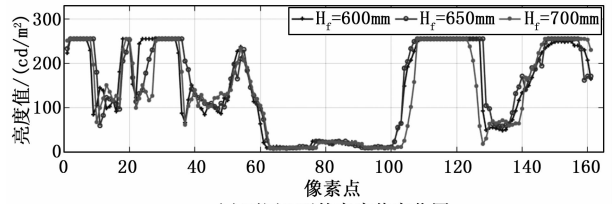


图 8 改变 l 的成像效果图

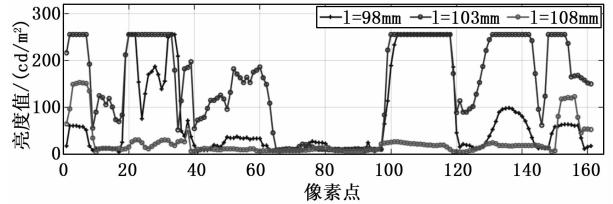
如图 8 所示, H_f 的改变对成像效果并不明显, 而 l 的改变对成像影响则较为显著。对每幅图像中的感兴趣区域 ROI^[21] (红色采样线区域) 进行扫描, 得到图像亮度值的变化趋势图。提取图像中扣件区域的平均亮度值, 如图 9、表 5 所示。图 9 (a) 表明, 若改变 H_f , 亮度曲线的整体走势基本一致, 扣件区域对比度均较高; 图 9 (b) 表明, 若改变 l , 仅当 $l = 103 \text{ mm}$ 时能够较好地识别出所有扣件区域。表 5 表明, 当 H_f 变化时, 图像中扣件区域的平均亮度几乎保持不变, 但当 l 变化时的影响很显著: l 偏小时, 扣件区域的上、下底座、钢轨下表面和弹条区域未能有效识别, l 偏大时, 所有扣件区域均呈现黑色, 严重影响扣件的辨识。因此, 在所有影响成像质量的参数中, l 占据最主要地位。

验证外界光照条件变化对成像效果的影响, 在轨检样车下方安装 2 个长条形 LED 光源, 通过控制 LED 光源来模拟外界光源的强弱, 并通过表 3 中的参数进行验证。实验证明, 环境光线大多为散射光, 射入不平滑的扣件区域表面后难以集中进入镜头, 对成像影响有限。成像效果如图

10 所示。



(a) 不同 H_f 下的亮度值变化图



(b) 不同 l 下的亮度值变化图

图 9 亮度值变化趋势图

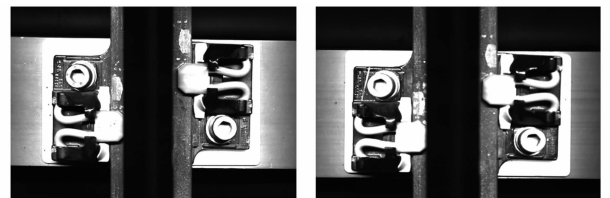
表 5 扣件区域平均亮度值表

区域	$H_f = 600\text{mm}$	$H_f = 650\text{mm}$	$H_f = 700\text{mm}$
下底座(白)	255	255	255
上底座(黑)	110	105	117
道钉	236	243	240
钢轨下表面	154	147	139
塑料区域	255	255	248
弹条	245	244	248

(a) 不同 H_f 下的扣件区域平均亮度值表

区域	$l = 98\text{mm}$	$l = 103\text{mm}$	$l = 108\text{mm}$
下底座(白)	60	255	152
上底座(黑)	13	110	14
道钉	194	247	26
钢轨下表面	35	145	11
塑料区域	251	253	22
弹条	82	251	18

(b) 不同 l 下的扣件区域平均亮度值表



(a) 环境光强 (b) 环境光弱

图 10 不同环境光照条件下的成像效果

3.2 振动补偿

推动实验样车在钢轨上运行, 记录采集过程中实验样车的加速度和角加速度数据。实验参数见表 6, 原始实验数据见表 7。

表 6 振动补偿实验参数

参数	D	d	u	v	H_g	l
大小/mm	36.5	20.0	85.0	650	335	103

表7 IMU数据

序号	$G_x/$ $m \cdot s^{-2}$	$G_y/$ $m \cdot s^{-2}$	$G_z/$ $m \cdot s^{-2}$	$A_x/$ $rad \cdot s^{-2}$	$A_y/$ $rad \cdot s^{-2}$	$A_z/$ $rad \cdot s^{-2}$
1	-0.192	-0.751	2.737	-0.042	0.045	-0.984
2	0.458	0.064	4.706	-0.031	0.054	-0.983
3	-1.126	0.000	-0.806	-0.034	0.048	-0.994
4	0.146	0.311	-1.035	-0.036	0.048	-0.984
5	-0.540	-0.824	2.948	-0.033	0.047	-0.999
6	-0.247	-0.137	-3.598	-0.042	0.041	-0.989
7	-0.467	-0.229	-0.769	-0.030	0.054	-0.992
8	0.394	0.696	-0.266	-0.035	0.047	-0.992

若直接对加速度与角加速度进行积分, 会产生趋势项和积分漂移, 带来明显的误差。采用互补滤波器进行滤波, 结合频域积分法可以有效地减少误差。积分后的数据见表8。

表8 运动的位移与角位移

序号	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta z/m$	$\Delta \alpha/rad$	$\Delta \beta/rad$	$\Delta \gamma/rad$
1	-0.0235	-0.0249	0.0030	-0.0433	0.0598	-0.0121
2	-0.0121	-0.0597	0.2680	-0.0479	0.0661	-0.0132
3	-0.0116	-0.0203	0.3590	-0.0431	0.0926	-0.0123
4	-0.0508	0.0116	0.0624	-0.0414	0.0908	-0.0121
5	-0.0432	-0.0065	0.0030	-0.0434	0.0602	-0.0124
6	-0.0367	-0.0458	0.0398	-0.0446	0.0669	-0.0123
7	-0.0465	-0.0411	-0.1554	-0.0458	0.0764	-0.0122
8	-0.0247	0.0033	-0.1696	-0.0435	0.0815	-0.0124

由表8可知, 第2、3组数据在z方向发生了较大幅度的振动。通过对六个方向分别进行振动补偿, 可以得到满足检测要求的图像。补偿后的图像如图11所示。

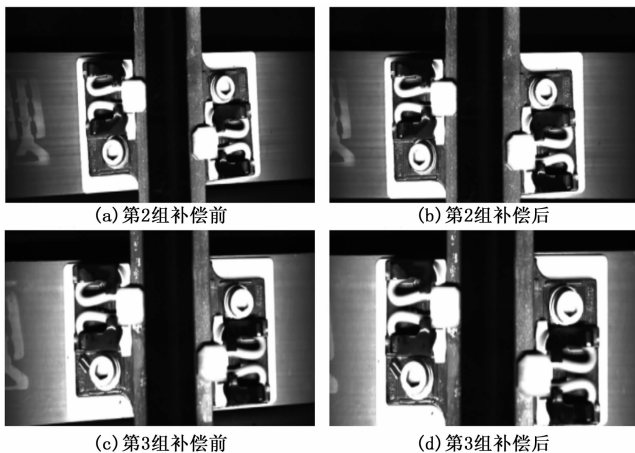


图11 补偿前后对比图

补偿前, 图11(a)约偏转 4.7° , 扣件区域直径占图像总长度的约59%; 图11(b)约偏转 4.5° 扣件区域直径占图像总长度的约68%; 经补偿后, 图像的偏转角度均消除, 同时将扣件区域分别放大至65%和75%, 放大比例超过10%, 有效地优化了图像质量。

4 结束语

快速实现高清晰度的图像采集一直都是图像处理的重要环节和前提条件。本文通过光源和振动补偿2个角度对成像造成的影响分别进行了研究: 对扣件区光源系统研究, 限制了外界光源的影响, 最大程度上提升成像质量; 使用IMU结合频域分析法实现了采集过程中的振动补偿, 并在理论分析的基础上加以实验验证。实验表明, 光源调节后的图像中, 扣件区域的亮度值提高了超过10倍, 提高了扣件与周围环境对比度, 使其更加容易辨识; 振动补偿后的图像中, 可修正由于振动造成的 $\pm 5^\circ$ 以内的图像旋转, 并突出了图像的主要扣件区域, 使图像更加统一。该方法符合理论基础, 对现有的图像采集和振动补偿方法进行了改进, 具有现实意义。

参考文献:

- [1] 于春华. 城市轨道交通轨道扣件综述 [J]. 铁道工程学报, 2003, 20 (3): 31-33.
- [2] 李彦平. 对铁路轨道板扣件存在问题的分析 [J]. 铁道工程学报, 2010, 27 (5): 19-21.
- [3] Gibert X, Patel V M, Chellappa R. Deep Multitask Learning for Railway Track Inspection [J]. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 2015, (99): 1-12.
- [4] 赵才友, 王平. 钢轨-扣件耦联系统的动力特性试验 [J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34 (4): 680-687.
- [5] 刘甲甲, 熊鹰, 李柏林, 等. 基于计算机视觉的轨道扣件缺陷自动检测算法研究 [J]. 铁道学报, 2016, 38 (8): 73-80.
- [6] 杭元元. 基于计算机视觉的铁路扣件检测算法研究 [D]. 西南交通大学, 2014.
- [7] 钱广春. 基于计算机视觉的铁路扣件缺失快速探测方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [8] 王一军, 张东, 杨勇. 一种基于结构光的扣件缺失判别新方法 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (13): 262-265.
- [9] 张博文. 微振动对刚体空间相机图像质量的影响分析 [J]. 测绘通报, 2014 (s1): 65-69.
- [10] 王智, 金光, 杨简. 激光主动照明成像技术: 分析和实验证明 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2004, 27 (4): 101-104.
- [11] 占栋, 于龙, 邱存勇, 等. 钢轨轮廓测量中的车体振动补偿问题研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (7): 1625-1633.
- [12] 鞠标, 朱洪涛, 徐鞠萍, 等. 基于轨检车振动问题的钢轨轮廓匹配方法研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36 (3): 65-69.
- [13] 占栋, 于龙, 肖建, 等. 基于计算机视觉的接触轨检测车振动补偿方法及应用 [J]. 铁道学报, 2013, 35 (1): 25-30.
- [14] 郑锐, 王元贵, 于龙, 等. 基于图像处理的振动补偿方法在接触轨检测中的应用 [J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17 (1): 91-94.
- [15] 李强, 王太勇, 胥永刚. 基于频域积分的振动参量转换修正算法 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005 (9): 60-61.

(下转第232页)