

文章编号:1001-5078(2010)01-0087-04

· 光电技术与系统 ·

钢轨磨耗动态测量结构光条纹中心提取算法

王伟华, 孙军华, 刘震, 张广军

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要:针对钢轨磨耗结构光动态测量中结构光条纹中心提取的实时性问题,提出一种新的序列图像中结构光条纹中心的快速提取算法。以上一帧图像中提取的钢轨条纹中心作为条纹中心的初始位置,首先对初始位置进行校正,以补偿传感器振动所带来的图像中条纹纵向变化,然后在法向方向上使用灰度质心法计算得到条纹中心的近似值,通过在近似值点计算单点Hessian矩阵获得条纹中心的亚像素精确位置。实验表明,该方法速度快、精度高,有效解决了基于结构光视觉的钢轨磨耗动态测量中条纹中心的实时精确提取问题。

关键词:钢轨磨耗;机器视觉;结构光;光条中心;Hessian矩阵

中图分类号:TN391;TN247 **文献标识码:**A

Stripe center extrication algorithm for structured-light in rail wear dynamic measurement

WANG Wei-hua, SUN Jun-hua, LIU Zhen, ZHANG Guang-jun

(Key Laboratory for Precision Opto-mechanical Technology of the Ministry of Education,
Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A new extrication algorithm for waist rail stripe center based on sequences images is proposed to accomplish structured-light stripe center extrication in rail wear dynamic measurement. The initial value of the stripe center, which is set to be the one in previous frame must be calibrated to offset deviation on y-axis caused by rail image vibration. Then, the approximate value of the stripe center is calculated by center of gravity method in normal direction. Structured light stripe center at sub-pixel precision is exacted though calculate signal-point Hessian matrix. The experimental results show that the proposed algorithm is fast, high precise, and can effectively resolve the problem of structured-light stripe center extrication in rail wear dynamic measurement.

Key words: rail wear; machine vision; structured-light; stripe center; Hessian matrix

1 引言

钢轨磨耗检测是铁路安全运营的重要保证,对于制定合理的铁路运输计划和降低维护成本是非常重要的。长期以来,对钢轨磨耗的测量都是由人工采用专用卡尺抽样检测,效率低下,无法实现在线动态测量。目前,随着机器视觉测量技术发展与日臻成熟,以结构光为代表的三维视觉测量技术因非接触、速度快、实时性强及主动受控等特点已成为物体表面磨耗测量最有效的方法。

基于结构光视觉的钢轨磨耗测量的研究已受到

广泛的重视,文献[1]~[3]对此做了研究,即由激光器投射光平面于钢轨内侧形成测量光条,相机采集光条纹图像,结构光条纹受到被测物体(钢轨)表面的调制而发生变化,要想准确地获得钢轨表面的尺寸数据信息,必须首先从图像中获取光条纹中

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60804060);铁道部科技研究开发计划项目(No. 2008G020-C)资助。

作者简介:王伟华(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉测量,光电测试技术。E-mail: Email: whwang0601@gmail.com

收稿日期:2009-08-04

心的准确位置信息。结构光条纹中心的快速、精确提取是实现钢轨磨耗动态测量的关键。

传统的光条纹中心线提取方法有极值法、阈值法、质心法等,这些方法实现简单,但精度不高,且易受噪声影响。贺俊吉^[4]等提出在光条截面上进行曲线拟合得到条纹中心的亚像素位置,由于需做滤波和去伪操作,执行速度有限。胡斌^[5]等提出了基于方向模板的结构光条纹中心检测方法,抗噪声能力较好,但数据存储量大。Steger^[6]法精度高,鲁棒性好,但运算量大,难以满足实时性要求高的应用场合。胡坤^[7]等将大模板高斯卷积的递归实现引入到 Steger 方法中,但由于 Hessian 矩阵方法计算量大,仍不能满足在线实时测量的要求。

针对上述问题,提出一种序列图像中钢轨结构光条纹中心的快速、亚像素级提取算法。该方法充分利用序列图像中的先验知识,以上一帧的提取结果为初始值,经校正后在光条法向法向上使用灰度质心法得到近似条纹中心,然后在近似值点通过计算单点 Hessian 矩阵获得条纹中心的精确位置。

2 系统测量原理

结构光视觉钢轨磨耗动态测量系统结构如图1所示。

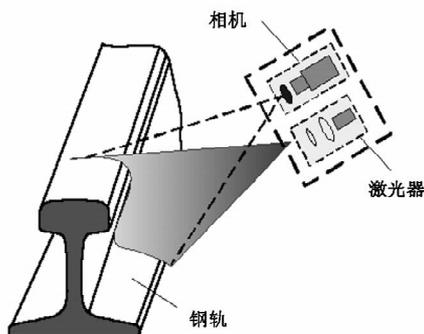


图1 系统测量原理示意图

结构光视觉传感器安装于列车底部,激光器投射光平面于钢轨表面形成测量光条,由位于一侧的摄像机拍摄获得测量光条图像。经图像处理提取结构光条纹中心点,采用视觉测量模型计算获得钢轨横截面轮廓的尺寸数据,通过与标准设计轮廓对比求得磨耗值。

在动态测量中,视觉传感器随列车运行,实现对钢轨磨耗的实时动态测量。如何快速、精确的提取结构光条纹中心是实现钢轨磨耗动态测量的关键。

3 序列图像条纹中心提取算法原理

在列车运行中,摄像机所拍摄的图像中光条位

置变化不大,因此序列图像中激光条纹中心提取算法可充分利用前一帧图像的先验知识,实现对后续帧的图像条纹中心的快速提取。该算法的基本原理包括如下步骤:

1)通过对第0帧图像中的条纹中心使用 Steger 算法精确提取,以保证较高的精度,并将此结果作为第1帧图像条纹中心的初始位置。如图2所示。

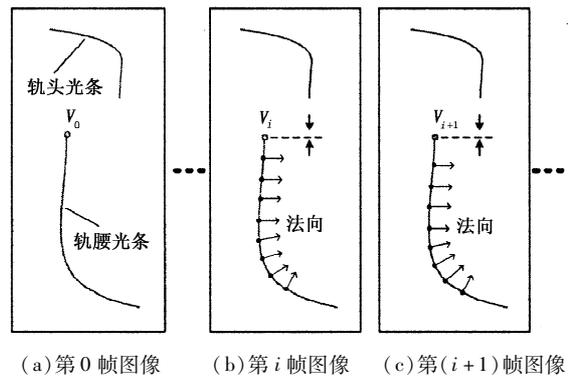


图2 激光条纹中心提取示意图

2)在后续帧的图像中,对上一帧图像得到的条纹中心初始点进行校正,消除振动带来的条纹中心位置变化。

3)在条纹中心初始位置点,沿法向方向的一段区域内使用灰度质心法,得到条纹中心的近似值。在近似中心点求取单点 Hessian 矩阵做精确化提取。

4)步骤3)的提取结果又作为下一帧图像条纹中心的初始位置,重复以上步骤,实现激光序列图像条纹中心的提取。

4 结构光条纹中心提取算法

4.1 条纹中心初始位置的校正

由于钢轨磨耗发生在轨头外侧和上边缘,轨头下边缘和轨腰部分并未磨损,所以随着列车的运行,摄像机获得钢轨序列图像轨腰上的光条形状及位置基本保持不变。但由于振动,传感器在钢轨横截面内振动不可避免,从而造成光条位置在所拍摄图像中纵向的变化。

如图2所示,轨腰上边的某一特征点 V_0, \dots, V_i 反应了序列图像中轨腰条纹整体在图像纵坐标方向的位置。

假设,第 i 帧图像中提取的轨腰条纹中心为:

$$X_i = [x_1^i \quad x_2^i \quad \dots \quad x_n^i]^T$$

$$Y_i = [y_1^i \quad y_2^i \quad \dots \quad y_n^i]^T \quad (1)$$

其中, n 表示提取轨腰条纹中心点个数。则第 $(i+1)$

帧图像的轨腰条纹中心初始点坐标 $(\tilde{X}_{i+1}, \tilde{Y}_{i+1})$ 为:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{i+1} &= X_i \\ \tilde{Y}_{i+1} &= Y_i + \Delta V_{i+1} \\ &= [y_1^i + \Delta V_{i+1} \quad y_2^i + \Delta V_{i+1} \quad \cdots \quad y_n^i + \Delta V_{i+1}]^T \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\Delta V_{i+1} = V_{i+1} - V_i$; X_i, Y_i 是第 i 帧图像中条纹中心精确提取结果。

4.2 条纹中心精确提取方法

线结构光是由激光器产生的点光源经圆柱透镜调制后形成的单色线激光。理想状况下, 激光条纹光强符合高斯分布, 其数学表达式为:

$$G(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

式中, A 为幅值, 表示曲线高度; σ 为标准差, 代表曲线跨度; u 为均值, 即为条纹中心。

设光条图像梯度方向灰度分布函数为 $f(x, y)$, 以上一帧图像获得的光条纹中心精确值作为当前帧的初始值, 经垂直校正以消除振动带来的影响。

假设光条上某点初始点为 (x_0, y_0) , 由上一帧 Hessian 矩阵求出的该点处条纹法向为 $n(n_x, n_y)$, 以初始点为中心, 在该法线方向上的一定区间内使用灰度质心法求取光条纹中心的近似值, 有:

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{m=1}^M f(x_m, y_m) \cdot x_m}{\sum_{m=1}^M f(x_m, y_m)} \\ y_c = \frac{\sum_{m=1}^M f(x_m, y_m) \cdot y_m}{\sum_{m=1}^M f(x_m, y_m)} \end{cases} \quad (4)$$

其中, M 为选取的有效区域长度。

$$y_m = \frac{n_y}{n_x} x_m + \left(y_0 - \frac{n_y}{n_x} x_0\right)$$

在光条近似中心点 (x_c, y_c) , 使用 Steger^[6] 的 Hessian 矩阵法提取亚像素条纹中心点。

条纹中心是函数灰度 $f(x, y)$ 的一阶导数过零点和二阶导数负极值点。光条图像梯度方向可利用 Hessian 矩阵求得。Hessian 矩阵特征值的绝对值中极大值所对应的特征向量即为光条梯度方向。Hessian 矩阵表示为:

$$\begin{aligned} H(x, y) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2} \end{bmatrix} \otimes z(x, y) \\ &= \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $g(x, y)$ 为二维高斯函数; $r_x, r_y, r_{xx}, r_{xy}, r_{yy}$ 由图像 $f(x, y)$ 分别与相应微分形式的高斯核卷积得到。

根据 Hessian 矩阵求得点 (x_c, y_c) 处图像梯度方向为 (n_x, n_y) , 其中 $\|(n_x, n_y)\| = 1$ 。从而得到光条中心点精确位置为:

$$(X_i, Y_i) = (x_c + tn_x, y_c + tn_y) \quad (6)$$

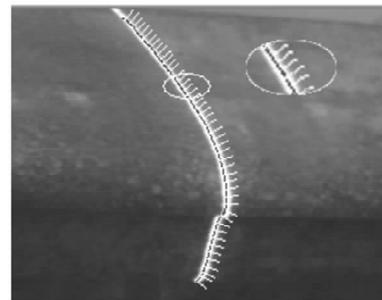
其中, $t = \frac{n_x r_x + n_y r_y}{n_x^2 r_{xx} + n_x n_y r_{xy} + n_y^2 r_{yy}}$, 且满足 $-0.5 < tn_x < 0.5, -0.5 < tn_y < 0.5$ 。

当前帧的提取结果 (X_i, Y_i) 又作为下一帧的初始位置, 实现序列图像中结构光条纹中心的快速精确提取。

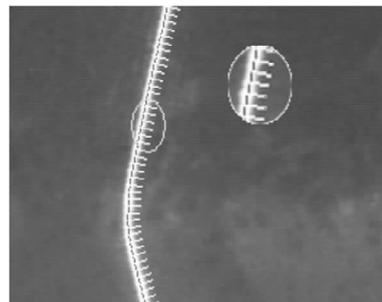
5 实验结果

采用 Mintron-1881 CCD 相机, 5 mW 半导体红光激光光源组成结构光视觉传感器。计算机配置为: Intel 2.20 GHz 双核 CPU, 2G 内存。图像分辨率为 768 pixel \times 576 pixel。在 Visual C++ 6.0 开发环境下实现本算法。

对由相机采集的钢轨光条图像使用本算法进行条纹中心的提取, 图 3 给出了轨头光条和轨腰光条的中心提取结果, 图中条纹旁边椭圆部分图像为条纹上椭圆部分的局部放大图, 条纹上白色小线段为条纹中心法向向量。



(a) 轨头结构光条纹中心提取图



(b) 轨腰结构光条纹中心提取图

图 3 钢轨结构光条纹中心提取结果

实验中初始帧的条纹中心的提取采用经典 Steger 方法, 对一组序列图像提取条纹中心, 表 1 给出

其中连续3帧本文算法和 Steger 算法结果比较,结果显示良好。

表1 算法条纹中心提取结果比较

| 帧数 | 整数坐标 (x/像素,y/像素) | Steger方法 (x/像素,y/像素) | 本文方法 (x/像素,y/像素) |
|-----|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 第1帧 | (432,61) | (432.07,60.95) | (432.08,60.94) |
| | (398,201) | (398.11,201.03) | (398.06,201.01) |
| | (365,445) | (364.96,445.01) | (364.96,445.00) |
| 第2帧 | (432,61) | (432.26,60.79) | (432.24,60.80) |
| | (398,201) | (397.87,201.11) | (397.85,201.10) |
| | (365,445) | (365.11,444.86) | (365.14,444.87) |
| 第3帧 | (432,61) | (431.95,61.13) | (431.93,61.13) |
| | (398,201) | (398.02,201.04) | (398.05,201.03) |
| | (365,445) | (365.06,444.95) | (365.04,444.96) |

对同一钢轨光条纹图像条纹中心的提取,经典 Steger 法需 370 ms(包括链接时间),文献[7]方法需 11 ms,而本文算法只需 3 ms。

6 结束语

提出了一种钢轨磨耗测量序列图像中结构光条纹中心的快速精确的提取算法,通过在线法方向使用质心法得到近似条纹中心,在该近似值点利用计算单点 Hessian 矩阵精确化提取得到条纹中心的准确值。实验结果表明,该方法有效减小了算法的运算量,速度快,实现了光条纹中心线的快速精确提取,满足钢轨磨耗动态测量的实时性要求。

参考文献:

[1] 丁大尉,纪淑波,王立志. 光电式钢轨磨耗实时检测系统[J]. 中国铁道科学,2006,27(1):24-27.

[2] 杨留君. 基于计算机视觉的钢轨磨耗测量系统的研究与实现[D]. 北京:北京交通大学,2007,12.

[3] 蒋本和,靳文瑞,纪淑波. 车载式钢轨磨耗近红外动态测量装置原理[J]. 激光与红外,2004,34(2):91-93.

[4] 贺俊吉,张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理研究方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(7):593-597.

[5] 胡斌,李德华,金刚. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. 计算机工程与应用,2002,(11):59-60.

[6] C Steger. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1998,20(2):113-125.

[7] 胡坤,周富强,张广军. 一种快速结构光条纹中心亚像素精度提取方法[J]. 仪器仪表学报,2006,27(10):1326-1329.