

文章编号 1004-924X(2011)03-0690-07

钢轨磨耗动态测量中激光光条中心的快速提取

孙军华,王 恒,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:针对钢轨磨耗动态测量中激光光条中心快速精确提取的问题,提出一种卡尔曼滤波和 Hessian 矩阵相结合的激光光条中心快速提取方法。首先,利用卡尔曼滤波实时预测钢轨磨耗动态测量中激光光条在图像中所在区域;然后,在预测的激光光条区域内,逐行搜索图像灰度最大点,将该灰度最大点作为激光光条图像中心的初始位置,在激光光条图像中心初始位置处利用 Hessian 矩阵计算得到光条中心的亚像素图像坐标;最终实现在激光光条区域内光条亚像素图像中心的快速提取。该方法显著减少了搜索区域及高斯卷积的数目,提高了激光光条中心提取的鲁棒性及速度。实验结果表明,在保证激光光条提取精度的前提下,每帧提取时间可达到 1.6 ms。

关键词:钢轨磨耗;动态测量;光条提取;区域预测;卡尔曼滤波

中图分类号:TP391;TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111903.0690

Rapid extraction algorithm of laser stripe center in rail wear dynamic measurement

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

*(Key Laboratory for Precision Opto-mechanical Technology of the Ministry of Education,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)*

Abstract: A center-extracted algorithm by combining the Kalman filter with the Hessian matrix was proposed for the implementation of real-time stripe processing in rail wear dynamic measurement. Firstly, the image region of a laser stripe in rail wear dynamic measurement was predicted with the Kalman filter method. Then, the points with max gray were searched in the predicted region of laser stripe line by line, and they were considered as the initial positions of laser stripe image center. Sub-pixel positions of laser stripe image center were then extracted through the calculation of Hessian matrix in the initial positions of laser stripe image center. Finally, the sub-pixel image center of laser stripe was obtained in the region of stripe. The proposed algorithm reduces the searching area and the number of Gaussian convolutions greatly, and improves the robustness and speed in the extraction of laser stripe centre in the rail wear dynamic measurement. Experimental results show that it takes 1.6 ms to process every frame, and the extraction accuracy of laser stripe is also guaranteed.

Key words: rail wear; dynamic measurement; stripe extraction; region prediction; Kalman filter

收稿日期:2010-06-29;修订日期:2010-07-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50727502; No. 60804060)

1 引言

随着高速铁路的快速发展,轨道检测技术成为实现高速铁路运输安全的重要保障^[1]。轨道检测技术主要包括轨道几何尺寸检测和钢轨磨耗检测两方面。长期以来,对钢轨磨耗的检测都是由人工采用专用卡尺抽样检测,这种方式效率低下,无法实现在线动态测量,测量中不可避免地引入测量者的人为因素,测量精度和可靠性不高。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、精度较高及实时性强等特点已获得广泛的应用。

目前,基于激光视觉的钢轨磨耗测量倍受业内人士关注。文献[2-3]对此做了研究,即在钢轨内侧设置一个单线结构光视觉传感器,激光器投射光平面于钢轨内侧,由钢轨断面成像系统观测光平面与被测钢轨相交形成的光条轮廓,通过特征提取和模型计算完成对钢轨磨耗的测量,这项测量需要提取光条中心,光条中心提取的速度及精度决定着钢轨磨耗测量的速度和精度。

传统的基于图像灰度的光条中心提取方法有灰度阈值法、极值法、边缘法等^[4],这些方法易于实现,但精度都不高。经典 Steger 方法精度高,鲁棒性好,但由于运算量较大,很难实现光条中心的在线快速提取,难以满足实时性要求较高的场合。吴庆阳^[5]等提出一种将可变方向模板与灰度重心法相结合的方法,首先计算出图像的阈值,对图像进行二值化、细化等处理,得到线结构光图像的骨架,再利用可变方向模板判断骨架上每点的法线方向,最后由灰度重心法得到光条中心坐标,其算法较为复杂,执行速度有限。李和平^[6]等利用遗传算法、图像处理、方向模板及人机交互的方法分割激光条纹并提取激光中心线,该方法具有一定的抗噪和断线修补能力,但需要人工参与。周富强^[7]等结合图像的阈值化和膨胀算法,分割出光条所在的区域,利用高斯卷积递归获得光条所在区域各点的 Hessian 矩阵,并确定出各点的

法线方向,最后在法向方向上利用泰勒级数展开得到光条中心的亚像素坐标,该方法在一定程度上提高了处理速度。

卡尔曼滤波是解决状态最优估计的一种常用算法。以递推算法简单、数据存储量小、实时性好等优点被广泛应用于舰船和飞机导航、目标跟踪等领域^[8],目前也被广泛应用于目标轨迹预测,且预测时具有无偏、稳定和最优的特点。

针对早期在固定光条区域提取光条中心存在的问题和卡尔曼滤波的特点,本文提出一种卡尔曼滤波光条区域预测和灰度最大值、Hessian 矩阵相结合的钢轨磨耗动态测量光条中心快速精确提取方法。

2 系统测量原理

钢轨磨耗激光视觉测量系统主要包括高速相机、线激光器、计算机、软件及机械结构等。

钢轨磨耗测量模型如图 1 所示,激光视觉传感器安装在火车的底部,激光器向钢轨内侧投射垂直于钢轨纵轴方向的光平面^[9],从而在钢轨表面形成测量光条。利用摄像机得到包含钢轨表面三维信息的激光视觉图像,经过图像处理得到光条中心的亚像素图像坐标,转换到摄像机坐标系下,得到钢轨表面的三维坐标,再通过旋转和平移将摄像机坐标系下的光条中心坐标转换到光平面坐标系下,最后将光条在光平面坐标系下的轮廓点配准到标准坐标系下,通过比较得到钢轨磨耗值。

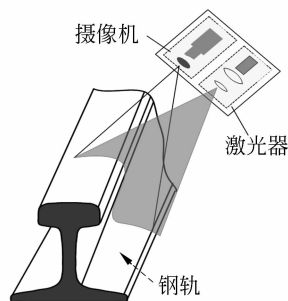


图 1 钢轨磨耗测量原理示意图

Fig. 1 Principle of rail wear measurement

在实际测量中,视觉传感器随火车运行,实现对钢轨磨耗的在线实时测量。在每帧处理中,光条中心提取耗用大部分时间,能否快速、准确地提取出光条中心决定着能否实现钢轨磨耗的实时测量。

3 算法原理

该算法包括以下步骤:

(1)首先给出光条区域,作为卡尔曼滤波区域预测的初始值,在后继的每帧中,利用卡尔曼滤波预测光条区域所在的位置;

(2)在卡尔曼滤波预测的光条区域内利用灰度最大值法与 Hessian 矩阵相结合的方法精确提取光条中心亚像素图像坐标;

(3)根据(2)中提取的光条中心坐标得到光条区域的准确位置,更新卡尔曼滤波的观测值,重复上述步骤,实现钢轨磨耗激光光条中心亚像素图像坐标的快速提取。

3.1 卡尔曼滤波算法描述

设 t_k 时刻的被估计状态 \mathbf{X}_k 受系统噪声序列 \mathbf{W}_{k-1} 驱动,系统状态方程可以描述为^[10-11]:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}_{k/k-1} \mathbf{U}_k + \Gamma_{k-1} \mathbf{W}_{k-1}, \quad (1)$$

量测方程为:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k, \quad (2)$$

式中: $\Phi_{k/k-1}$ 为 t_{k-1} 时刻至 t_k 时刻的一步转移矩阵; Γ_{k-1} 为系统噪声驱动阵; \mathbf{U}_k 为控制量(若没有控制量, \mathbf{U}_k 为零); $\mathbf{B}_{k/k-1}$ 为控制量矩阵; \mathbf{H}_k 为量测矩阵; \mathbf{V}_k 为量测噪声序列; \mathbf{W}_k 为系统激励噪声序列; 本文假定 \mathbf{V}_k 和 \mathbf{W}_k 是互不相关零均值高斯白噪声。

卡尔曼滤波递推算法为:

状态一步预测:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \quad (3)$$

一步预测均方误差:

$$\mathbf{P}_k = \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T, \quad (4)$$

滤波增益:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, \quad (5)$$

状态估计:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}), \quad (6)$$

估计均方误差:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k)^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T, \quad (7)$$

上述公式中: \mathbf{I} 为单位阵; \mathbf{Q}_k 为 \mathbf{W}_k 的自协方差阵; \mathbf{R}_k 为 \mathbf{V}_k 的自协方差阵。只要给定初值 $\hat{\mathbf{X}}_0$ 和 \mathbf{P}_0 , 根据 k 时刻的量测值 \mathbf{Z}_k , 就可以递推计算得 k 时刻的状态估计 $\mathbf{X}_k (k=1, 2, \dots)$ 。如此反复递推运算。

3.2 光条区域预测

在跟踪预测过程中,由于相邻两帧间的时间间隔较短,目标运动状态变化较小,可近似认为目标在 X, Y 轴上均做一个由随机加速扰动的直线运动,加速度 a 是一随机量 $a(t) \sim N(0, \sigma_a)$ 。虽然火车运行过程中的晃动导致光条在图像上表现为上下左右的移动,但光条的大小基本上不变化,只要得到光条顶点的坐标即可判断出光条区域。

令状态向量表示为 $\mathbf{X}_k: [x_k, y_k, x_k', y_k']^T$, 其中 x_k, y_k 分别是光条顶点在 X, Y 轴上的坐标分量, x_k', y_k' 分别是光条顶点在 X, Y 轴上的速度。观测向量为: $\mathbf{Z}_k: [x_{mk}, y_{mk}]^T$, x_{mk} 和 y_{mk} 分别为当前帧观测到的光条顶点在 X, Y 轴上的坐标信息。

X 轴上由牛顿运动定律可知 (t 为时间变量):

$$x_k = x_{k-1} + x_{k-1}' t + \frac{1}{2} \mathbf{W}_k t^2, \quad (8)$$

$$x_k' = x_{k-1}' + \mathbf{W}_k t. \quad (9)$$

同理在 Y 轴上也有相似的方程,公式(1)和(2)可以表示为公式(10)和(11)形式:

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ x_k' \\ y_k' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ x_{k-1}' \\ y_{k-1}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t^2/2 \\ t^2/2 \\ t \\ t \end{bmatrix} \mathbf{W}_k, \quad (10)$$

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} x_{mk} \\ y_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ x_k' \\ y_k' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{V}_k, \quad (11)$$

初始速度设为零, $\mathbf{X}_0 = [x_0 \ y_0 \ 0 \ 0]^T$, 其中 $[x_0 \ y_0]$ 为起始帧光条顶点的位置。系统噪声

W_k 和量测噪声 V_k 的方差根据测量情况给定。

初始估值的协方差矩阵对滤波影响不大,一般情况下取较大的值,即 A 取较大的值。

$$P_0 = AI_{4 \times 4}. \quad (12)$$

3.3 激光光条中心亚像素图像坐标提取方法

激光光条是由激光器产生的点光源经圆柱透镜调制后形成的单线激光,在理想情况下,激光光强服从高斯分布^[12],假设光条图像边缘法线方向灰度分布函数为 $f(x, y)$ 。在光条预测区域内利用灰度最大值法提取光条中心灰度最大点 (x_m, y_m) 。

对于二维图像,光条中心点处的一阶导数为零,且二阶导数取负的极值。以光条中心灰度最大点 (x_m, y_m) 为中心点,通过 Hessian 矩阵提取光条中心的亚像素图像坐标。光条图像边缘法线方向 (n_x, n_y) 对应 Hessian 矩阵的最大绝对特征值对应的特征向量。其 Hessian 矩阵表示为:

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} \\ -g_{xy} & g_{yy} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

求出 Hessian 矩阵最大绝对特征值对应的特征向量即激光光条在 (x_m, y_m) 处边缘法线方向 (n_x, n_y) , 其中 $\|(n_x, n_y)\| = 1$ 。令

$$t = -\frac{n_x g_x + n_y g_y}{n_x^2 g_{xx} + 2n_x n_y g_{xy} + n_y^2 g_{yy}}, \quad (14)$$

其中 $g_x, g_y, g_{xx}, g_{xy}, g_{yy}$ 由图像灰度函数 $f(x, y)$ 与相应微分形式的高斯卷积核得到。

如果

$$(tn_x, tn_y) \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \times \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right],$$

则光条中心点亚像素坐标为^[13]:

$$(x_p, y_p) = ((tn_x + x_m), (tn_y + y_m)). \quad (15)$$

4 实验及结果分析

4.1 仿真实验

为了验证卡尔曼滤波对光条区域预测模型的可行性,在基于 Matlab 6.1 环境下进行了仿真实验,令公式(10)中的 $t=1$,公式(12)中的 $A=20$,初始值 $X_0 = [63 \ 664 \ 0 \ 0]^T$,系统噪声 W_k 和量测噪声 V_k 的方差 $\sigma_w = \sigma_v = 5$,取 32 个点进行跟踪预测,预测结果及预测误差如图 2 和 3 所示。

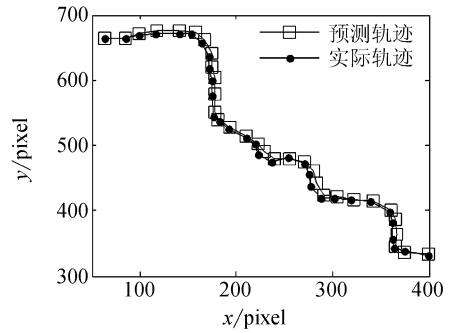


图2 位置预测

Fig. 2 Simulation diagram of position prediction

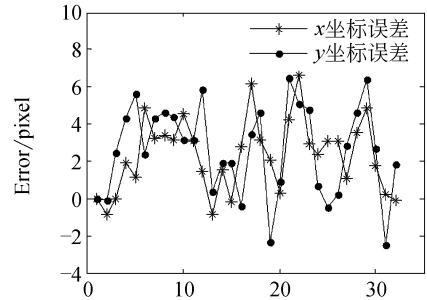


图3 位置预测误差

Fig. 3 Simulation diagram of position prediction error

由图 2 和图 3 可以看出,在系统噪声 W_k 和量测噪声 V_k 的方差 $\sigma_w = \sigma_v = 5$ 时,利用卡尔曼滤波进行位置预测在 x, y 方向的误差小于 10 pixel。实物实验图像分辨率为 $1\ 280 \text{ pixel} \times 1\ 024 \text{ pixel}$,且光条区域在 x, y 方向上大小分别为 190 和 700 pixel,卡尔曼滤波位置预测在 x, y 方向小于 10 pixel 的误差对得到的光条区域影响不大,可以实现光条区域的跟踪预测。

4.2 实物实验

选用高速 CMOS 相机和大功率激光器各一个组成激光视觉传感器,计算机配置为 Intel 2.6 GHz 双核 CPU, 2G 内存。图像分辨率为 $1\ 280 \text{ pixel} \times 1\ 024 \text{ pixel}$ 。在 Visual C++ 6.0 开发环境下实现下面的算法。

选取实拍图像中的 800 frame 进行跟踪预测并提取激光光条中心亚像素图像坐标,任意选取其中的 5 帧,结果如图 4,5 所示。其中图 4 为卡尔曼滤波区域预测结果,图中白色方框为卡尔曼滤波预测的光条区域;图 5 为在卡尔曼滤波预测的光条区域内,光条中心亚像素图像坐标提取结果。

对上述 5 帧图像分别使用本文方法和经典 Steger 法进行光条中心亚像素图像坐标提取,每帧图像中轨头和轨腰上分别任取 2 个点,共计 20 个点进行比较,结果如表 1 所示。

由图 4 中卡尔曼滤波区域预测结果可以看出,卡尔曼滤波预测的光条区域与实际光条区域基本上一致,可以实现光条区域的预测。

本文方法提取的光条中心亚像素图像坐标与经典 Steger 法提取的光条中心亚像素坐标比较,由图 5 和表 1 可得 RMS 误差为 0.02 pixel,满足精度要求。而且同一幅大小为 $1\ 280\ \text{pixel} \times 1\ 024\ \text{pixel}$ 的激光光条图像使用经典 Steger 法进行全提取需要 339 ms,使用本文方法仅需 1.6 ms。

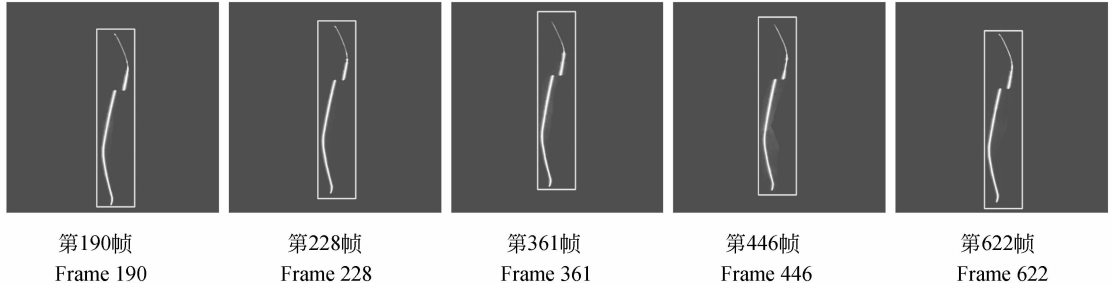


图 4 卡尔曼滤波光条区域预测结果

Fig. 4 Results of stripe area prediction by Kalman filter

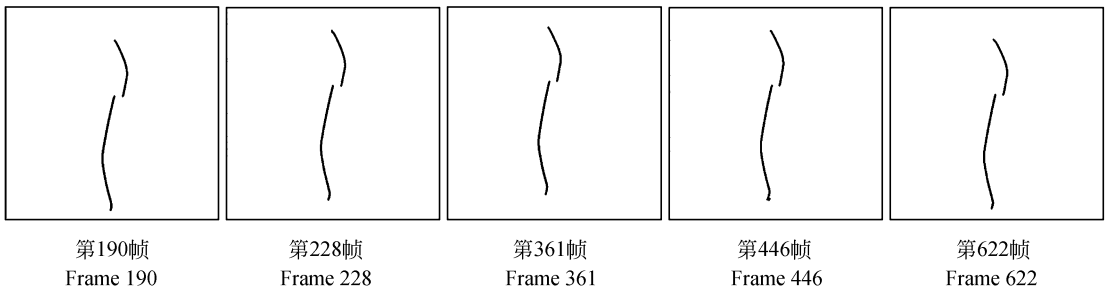


图 5 光条中心亚像素图像坐标提取结果

Fig. 5 Sub-pixel extraction results of stripe center image coordinate

表 1 光条中心亚像素图像坐标提取结果比较(单位:像素)

Tab. 1 Comparison of extraction results for sub-pixel stripe center image coordinates (Unit: pixel)

帧数	Steger 法 (x, y)	本文方法 (x, y)	帧数	Steger 法 (x, y)	本文方法 (x, y)
190	(643.05, 310.97)	(643.04, 310.98)	360	(542.29, 560.06)	(542.31, 560.07)
	(674.20, 435.05)	(674.20, 435.05)		(519.24, 722.97)	(519.25, 722.97)
	(579.41, 615.09)	(579.41, 615.10)	446	(605.28, 270.84)	(605.29, 270.84)
	(549.32, 771.98)	(549.30, 771.98)		(631.08, 406.02)	(631.10, 406.03)
228	(648.88, 313.05)	(648.88, 313.05)	622	(558.36, 526.10)	(558.37, 526.11)
	(648.48, 434.11)	(648.48, 434.12)		(522.83, 739.02)	(522.83, 739.02)
	(574.05, 540.02)	(574.05, 540.01)	361	(612.06, 295.96)	(612.06, 295.96)
(537.32, 739.96)	(537.34, 739.97)	(647.02, 439.00)		(647.01, 439.00)	
361	(606.57, 270.24)	(606.56, 270.25)		(573.93, 555.98)	(573.95, 555.99)
	(620.83, 410.96)	(620.83, 410.95)		(537.93, 801.01)	(537.93, 801.02)

5 结 论

本文利用卡尔曼滤波实时预测钢轨磨耗动态测量中激光光条在图像中所在的区域,在预测的激光光条区域内使用灰度最大值法与 Hessian 矩阵相结合的方法提取光条中心亚像素图像坐标。该方法在预测的激光光条区域内按行搜索灰度最

大点,然后只在得到的灰度最大点处利用 Hessian 矩阵精确提取光条中心的亚像素图像坐标,大大减少了搜索范围及高斯卷积的数目,减少了激光光条中心提取的冗余计算。实验证明,本文算法在保证提取精度的前提下,钢轨磨耗动态测量激光光条中心提取的鲁棒性得到提高,每帧光条中心提取时间仅需 1.6 ms,大大提高了提取速度。

参考文献:

- [1] 陈东生,田新宇. 中国高速铁路轨道检测技术发展[J]. 铁道建筑,2008,10:82-86.
CHEN D SH, TIAN X Y. Development of high-speed railway track detection in China [J]. *Railway Engineering*, 2008, 10: 82-86. (in Chinese)
- [2] POPOV, DMITRY V, TITOV, *et al.*. Rail head's wear measurements using the CCD photonic system [J]. *SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1999, 3901: 32-36.
- [3] 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):64-67.
DING D W, JI SH B, WANG L ZH. Photoelectric rail-time detection system for rail abrasion [J]. *China Railway Science*, 2006, 27(1): 64-67. (in Chinese)
- [4] 贾倩倩,王伯雄,罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取[J]. 光学精密工程,2010,18(2):390-396.
JIA Q Q, WANG B X, LUO X ZH. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 390-396. (in Chinese)
- [5] 吴庆阳,苏显渝,李景镇,等. 一种新的线结构光光带中心提取算法[J]. 四川大学学报(工程科学版),2007,39(4):151-155.
WU Q Y, SU X Y, LI J ZH, *et al.*. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe [J]. *Journal of Sichan Niuversity(Engineering Science Edition)*, 2007, 39(4): 151-155. (in Chinese)
- [6] 李和平,李德华,朱洲,等. 基于遗传算法的结构光条纹中心检测方法[J]. 光学精密工程,2004,12(1):82-87.
LI H P, LI D H, ZHU ZH, *et al.*. Detection of structured light stripe center line based on genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 82-87. (in Chinese)
- [7] 周富强,陈强,张广军. 结构光光条提取的混合图像处理方法[J]. 光电子·激光,2008,19(11):1534-1537.
ZHOU F Q, CHEN Q, ZHANG G J. Composite image processing for center extraction of structured light stripe [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(11): 1534-1537. (in Chinese)
- [8] 黄铤,张天琪,高清山,等. 一种提高无迹卡尔曼滤波精确度的方法[J]. 计算机仿真,2010,27(3):348-352.
HUANG Y, ZHANG T Q, GAO Q SH, *et al.*. A method improving the accuracy of UKF [J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(3): 348-352. (in Chinese)
- [9] 王伟华,孙军华,刘震,等. 钢轨磨耗动态测量结构光条纹中心提取算法[J]. 激光与红外,2010,40(1):87-90.
WANG W H, SUN J H, LIU ZH, *et al.*. Stripe center extrication algorithm for structured-light in rail wear dynamic measurement [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 87-90. (in Chinese)
- [10] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Journal of Basic Eng (ASME)*, 1960, 82D: 35-45.
- [11] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
QIN Y Y, ZHANG H Y, WANG SH H. *Kalman Filter And the Principle of Integrated Navigation* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998. (in Chinese)
- [12] 熊会元,宗志坚,陈承鹤. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. 光学精密工程,2009,17(5):1057-1062.
XIONG H Y, ZONG ZH J, CHEN CH H. Accurately extracting full resolution centers of struc-

tured light stripe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1057-1062. (in Chinese)

[13] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear

structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.

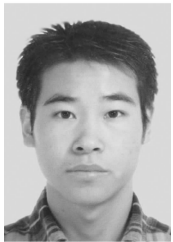
作者简介:



孙军华(1975—),男,湖北荆门人,博士,副教授,2006年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: sjh@buaa.edu.cn



刘震(1975—),男,辽宁沈阳人,博士,讲师,2010年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: liuzhen008@buaa.edu.cn



王恒(1985—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: hwang@aspe.buaa.edu.cn



张广军(1965—),男,天津人,教授,博士生导师,1991年于天津大学获得博士学位,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn

● 下期预告

Rainbow 型压电换能结构的有限元分析与实验

刘祥建,陈仁文

(南京航空航天大学 智能材料与结构航空科技重点实验室,江苏 南京 210016)

提出了一种多方向振动能量收集装置的设计结构,该装置的换能部分采用了一种新颖的 Rainbow 型压电结构。为了分析和测试 Rainbow 型压电换能结构的发电性能,对其进行了有限元分析和实验测试。有限元分析表明,金属基片的宽度与厚度、压电薄膜的宽度与长度及换能结构初始曲率半径的增大将会引起换能结构输出开路电压的降低;金属基片长度的增大将会引起换能结构输出开路电压的增加;压电薄膜厚度的增大将会使得换能结构输出开路电压先增加后减小。实验显示,有限元分析与实验结果具有较好的一致性,且都在压电薄膜厚度为 0.25 mm 时,换能结构的输出电压最大,验证了有限元分析的可靠性;在输出功率测试中,换能结构的输出功率达到了 7.75 μW 。得到的分析及测试结果可为 Rainbow 型压电换能结构的设计、制作提供指导性意见。