

结合高斯滤波器和骨架的结构光中心提取算法

熊厚旺,陈建政

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:为提高利用结构光测量技术求取地铁接触轨几何参数产生的光条中心线提取的效率和实时性,在 Steger 算法的基础上,设计一种结合 IIR 型高斯滤波器和光条骨架的结构光中心快速提取算法。该算法利用光条骨架特性对结构光中心区域进行快速定位,优先对定位区域的像素点进行算法运算,同时利用 IIR 型高斯滤波器的递归方法简化原算法的运算过程。实验结果表明:改进算法能有效地缩短运算所耗费的时间,与原算法相比,改进算法的运算时间提高了 57% 以上,并能达到与原算法同等的提取精度。

关键词:图像处理;线结构光;Steger 算法;高斯滤波器;骨架;地铁接触轨

中图分类号:TH123 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0065-04

Center Extraction Algorithm for Structured Light Combining Gaussian Filter and Skeleton

XIONG Houwang, CHEN Jianzheng

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to improve the calculation efficiency and real-time performance of extracting the center line of the light strip generated by structured light measurement technology to obtain the geometric parameters of the subway contact rail, a fast algorithm for extracting the center line of the structured light is designed based on Steger algorithm that combines IIR Gaussian filter and light strip skeleton. In this algorithm, the skeleton characteristics of light stripe are considered to locate the central region of structured light quickly and to calculate the pixels in the location region with preference, and the recursive method of IIR Gaussian filter, meanwhile, is applied to simplify the operation process of the original algorithm. The experimental results show that the improved algorithm can effectively shorten the operation time with an over 57% increase in time efficiency compared with the original algorithm, while the extraction accuracy maintains the same as the original algorithm.

Keywords: image processing; linear structured light; Steger algorithm; Gaussian filter; skeleton; metro contact rail

0 引言

线结构光测量技术具有稳定性高、抗干扰性强的特点,在三维图像处理系统中运用广泛^[1]。其主要工作原理是激光器产生的线结构光束投射在被测工件表面,利用 CCD 相机拍摄调制后的结构光光带图像,再依据光带中心位置的偏移信息计算求得目标物体的三维几何参数。其中快速、准确地提取光带条纹中心的位置是测量技术的关键。

常见的光条纹中心提取方法有极值法、曲线拟合法和灰度质心法等。大多数算法经过改进后在精度上能够满足测量需求^[2-3],但忽视了对提取速度的分析,而且光条中心提取速度影响着检测系统的实时性。测量实时效果好才能带来更好的使用体验和实际应用价值。如今,采用车载方式进行动态巡检是现代轨道交通基础设施检测及维护的发展趋势,这需要车载检测系统能够迅速处理采集的数据并发送指令至执行端,或将处理好的数据发送至终端,让相关人员了解检测对象实时的情况。例如无人驾驶技术需要检测系统的反馈及时并对周围环境进行实时的

监测。

目前越来越多研究重心放在提高光条中心的提取速度上。雷海军等^[4]提出了一种将阈值法和可变方向模板法相结合的快速检测结构光光条中心的方法;孙军华等^[5]利用卡尔曼滤波实时预测激光光条所在的区域,使用灰度最大值法和海森矩阵法相结合的方法提取光条中心亚像素坐标,使计算速度显著提升。Steger 算法具有精度高、鲁棒性好的优点,其缺点是运算量大,难以实现光条中心的快速提取。

本文将在 Steger 算法的基础上进行改进,引入光条骨架,将算法运算区域集中在光条骨架附近,同时利用 IIR 型高斯滤波器提高海森矩阵的运算效率,求得光条纹各点的法线方向,并在该法线方向寻找光条中心点。

1 Steger 算法基本原理

Steger 算法是对曲线拟合思想的改进,处理图像时将图像按二维函数进行处理,寻找二维函数极值点,把像素点用二次泰勒公式展开,通过计算该多项式极值的方法来寻找光带中心。

设图像的任意一点的像素坐标为 (x_0, y_0) ,对图像用二次泰勒公式展开:

$$r(x, y) = r(x_0, y_0) + [(x-x_0)(y-y_0)] \begin{bmatrix} r_x(x_0, y_0) \\ r_y(x_0, y_0) \end{bmatrix} + \frac{1}{2} [(x-x_0)(y-y_0)] \begin{bmatrix} r_{xx}(x_0, y_0) & r_{xy}(x_0, y_0) \\ r_{xy}(x_0, y_0) & r_{yy}(x_0, y_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (x-x_0) \\ (y-y_0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

由表达式可知,对图像采用泰勒公式展开时,需要求解图像的各项偏导数 r_x, r_y, r_{xy}, r_{xx} 和 r_{yy} 。图像偏导数一般采用卷积模板的方法进行求解。由于激光条纹的高斯分布特性,采用高斯函数的各项偏导数作为卷积模板,与图像 $r(x, y)$ 进行卷积,得到各项偏导数。

泰勒二次展开公式第三项系数为海森矩阵,如下式所示:

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

式中 $g(x, y)$ 为二维高斯函数。

由海森矩阵的性质可知, $H(x, y)$ 的两个特征值分别对应图像像素点 (x, y) 处的二阶极大值和极小值,对应特征向量描述了特征值方向。设 (x_0, y_0) 的法线方向为 (n_x, n_y) ,在 (n_x, n_y) 所指方向上寻找二阶导数大于设定阈值的点即中心特征点,若求得特征点,则法线方向 (n_x, n_y) 与 $H(x_0, y_0)$ 中最大绝对特征值的特征向量对应, $r(x_0, y_0)$ 在 (n_x, n_y) 方向上的二阶导数与 $H(x_0, y_0)$ 最大绝对特征值对应^[6]。

图像像素点 (x_0, y_0) 沿上述法线方向 (n_x, n_y) 的泰勒展开可以表示为

$$r(x_0+tn_x, y_0+tn_y) = r(x_0, y_0) + tn_x r_x(x_0, y_0) + tn_y r_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2} t^2 n_x^2 r_{xx}(x_0, y_0) + t^2 n_x n_y r_{xy}(x_0, y_0) + \frac{1}{2} t^2 n_y^2 r_{yy}(x_0, y_0) \quad (3)$$

式中: t 为像素点 (x_0, y_0) 沿法线方向移动寻找特征点的步长系数, (tn_x, tn_y) 为像素点在法线方向的偏移量。对于二维图像 $r(x, y)$,因为结构光截面呈高斯分布,则在光带中心点处一阶导数过0点,可认为在法线方向 (n_x, n_y) 上一阶导数为0,并且二阶导数绝对值极大值所对应点为光带特征中心点,则将式(3)对 t 进行一阶偏导^[6]:

$$\frac{\partial}{\partial t} r(x_0+tn_x, y_0+tn_y) = 0 \quad (4)$$

联立式(3)、式(4)求取能满足光带中心点条件的 t :

$$t = -\frac{n_x r_x + n_y r_y}{n_x^2 r_{xx} + 2n_x n_y r_{xy} + n_y^2 r_{yy}} \quad (5)$$

则图像灰度极值点为 $(p_x, p_y) = (x_0+tn_x, y_0+tn_y)$ 。

由于算法提取精度为亚像素级别,需在法线方向上逐个在各像素点的一个像素范围内寻找极值点。因此极值点应位于以像素点 (x'_0, y'_0) 为中心的一个像素范围内,像素点 (x'_0, y'_0) 在初始点 (x_0, y_0) 的法线方向上,且与极值点距离最近。通过上述描述可以得到极值点的判断条件:一阶导数过0点, $(tn_x, tn_y) \in [-0.5, 0.5] \times [-0.5, 0.5]$,同时在 (n_x, n_y) 方向上的海森矩阵最大特征值大于指定

的阈值,则该点 (p_x, p_y) 为光带的中心点^[7]。

通过对Steger算法的原理分析可知,为了得到海森矩阵,该算法需要对图像各个像素点进行5次二维高斯卷积计算,若图像大小过大会增加算法的运算量,很难实现中心线的实时提取。因此,需要从两方面对该算法进行优化:1)光条边缘部分大多数情况下并不是光条的理论中心位置,可以尽量避免光条的边缘点参与算法的运算过程;2)若二维高斯模板的大小为 $n \times n$,则一次二维卷积的运算量为 n^2 次乘加,图像和高斯模板越大,卷积运算的运算量就越大,可以针对卷积运算过程进行简化,以减少运算量。

2 对传统Steger算法的优化

2.1 引入光条骨架对光条中心区域进行定位

骨架是二维二值目标的重要拓扑描述,它是指图像中央的骨骼部分,是描述图像几何及拓扑性质的重要特征之一,同时具有较高的提取速度。将其应用在结构光中心提取领域,能够快速定位光条的中心区域,在对光条各行进行算法运算时,优先对骨架点所对应的光条点进行该点海森矩阵的求取,若所得结果不满足判断条件,则对该点相邻位置的其他像素点进行运算,直至求得满足条件的光条中心点。

2.2 IIR型高斯滤波器对卷积运算的简化

LIBC和MASD^[8]提出,任意形状的滤波器都可以用递归的方法实现,文献[9]分析了高斯滤波器及其微分形式滤波器,并提出各形式滤波器的递归算法。这种滤波器称为IIR(有限长单位冲激响应)型的高斯滤波器,也被称为递归滤波器。本文将该递归优化算法应用在对图像高斯卷积运算的优化上,以提高传统Steger算法的运算效率。

递归高斯滤波是在高斯函数基础上的一个近似表达式:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \approx \frac{1}{a_0 + a_2 t^2 + a_4 t^4 + a_6 t^6} \quad (6)$$

式中 a_0, a_2, a_4, a_6 都是能算出的常数。

由于高斯函数的傅里叶变换仍为高斯函数,用 q 代替 σ ,分子用 A_0 代替,则在傅里叶域中,高斯函数的近似表达式为

$$G_q(w) = \frac{A_0}{a_0 + a_2 (qw)^2 + a_4 (qw)^4 + a_6 (qw)^6} \quad (7)$$

用 $s=jw$ 代入式(7),即可得拉普拉斯域高斯函数的近似多项式

$$G_q(s) = \frac{A_0}{a_0 - a_2 (qs)^2 + a_4 (qs)^4 - a_6 (qs)^6} \quad (8)$$

将上式进行因式分解并进行 Z 变换将表达式由 s 域转至 z 域,得到以下两式:

$$H_L(z) = \frac{A_1}{b_0 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2} - b_3 z^{-3}} \quad (9)$$

$$H_R(z) = \frac{A_1}{b_0 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2} - b_3 z^{-3}} \quad (10)$$

最后利用 Z 变换的时域特性对式(9)求解差分方程:

$$\begin{aligned} \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{A_1}{b_0 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2} - b_3 z^{-3}} \\ \Rightarrow A_1 X(z) &= b_0 Y(z) - b_1 z^{-1} Y(z) - b_2 z^{-2} Y(z) - b_3 z^{-3} Y(z) \\ \Rightarrow A_1 x[n] &= b_0 y[n] - b_1 y[n-1] - b_2 y[n-2] - b_3 y[n-3] \\ \Rightarrow y[n] &= Bx[n] + (b_1 y[n-1] + b_2 y[n-2] + b_3 y[n-3]) / b_0 \end{aligned} \quad (11)$$

同理由式(10)求解差分方程:

$$y(n) = Bx(n) + [b_1 y(n+1) + b_2 y(n+2) + b_3 y(n+3)] / b_0 \quad (12)$$

式中 $B = 1 - (b_1 + b_2 + b_3) / b_0$

式(11)为高斯滤波的前项递归输出,式(12)为后项递归输出。对图像先后进行这两个差分方程计算就能实现高斯滤波。由于对图像的高斯滤波就是利用高斯滤波器对图像进行高斯卷积的结果,假设输入图像为 $P_{in}[n]$,在对图像进行前向递归得 $w[n]$,再进行后向递归后,得到高斯卷积结果 $P_{out}[n]$ 为

$$\begin{cases} w[n] = BP_{in}[n] + (\sum_{i=1}^3 b_i w[n-i]) / b_0 \\ P_{out}[n] = Bw[n] + (\sum_{i=1}^3 b_i P_{out}[n+i]) / b_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$$b_0 = 1.578\ 25 + 2.444\ 13q + 1.428\ 1q^2 + 0.422\ 205q^3$$

$$b_1 = (2.444\ 13q + 2.856\ 19q^2 + 1.266\ 61q^3)$$

$$b_2 = -(1.428\ 1q^2 + 1.266\ 61q^3)$$

$$b_3 = 0.422\ 205q^3$$

$$q = \begin{cases} 0.987\ 11\sigma - 0.963\ 30 & \sigma \geq 2.5 \\ 3.971\ 56 - 4.145\ 44\sqrt{1 - 0.268\ 91\sigma} & 0.5 \leq \sigma \leq 2.5 \end{cases}$$

对图像高斯卷积的一阶微分、二阶微分前项递归输出和后项递归输出为:

$$\begin{cases} w'[n] = B(P_{in}[n+1] - P_{in}[n-1]) / 2 + \\ (\sum_{i=1}^3 b_i w'[n-i]) / b_0 \\ P_{out}'[n] = Bw'[n] + (\sum_{i=1}^3 b_i P_{out}'[n+i]) / b_0 \\ w''[n] = B(P_{in}[n] - P_{in}[n-1]) + \\ (\sum_{i=1}^3 b_i w''[n-i]) / b_0 \\ P_{out}''[n] = B(w''[n+1] - w''[n]) + \\ (\sum_{i=1}^3 b_i P_{out}''[n+i]) / b_0 \end{cases}$$

通过分析高斯卷积及其微分形式的递归式可发现,该方法相对于传统 Steger 算法,受高斯核 σ 的影响减小,传统 Steger 法的卷积模板大小与高斯核取值有关,而高斯核的取值又与光条宽度有关,高斯核增大会造成高斯卷积模板增大,最终导致运算量的增加。而在本文方法中 σ 仅用于定义 q 值, b_0, b_1, b_2, b_3 和 B 为与 q 有关的值,在对某一行光条进行中心点提取时只被计算一次。因此高斯卷积结果求解过程的计算量固定,且本次的输出结果能作为

下一点计算的输入值,这使得海森矩阵的计算效率大大提升,能有效提高结构光中心提取速度。

2.3 结构光中心提取步骤

对于一张光条图像,用本文所介绍方法进行中心线快速提取需进行如下步骤:

- 1) 提取光条骨架上一点 p , 并定位该点在光条图像中的对应点 P ;
- 2) 得到点 P 所在行的光条宽度 w , 以 w 的值确定高斯核 σ , 再以高斯核 σ 确定递归算法的系数 q, b_0, b_1, b_2, b_3 和 B ;
- 3) 利用高斯卷积及其微分形式的递归表达式计算各项偏导数 r_x, r_y, r_{xy}, r_{xx} 和 r_{yy} ;
- 4) 求解点 P 海森矩阵的特征值和特征向量, 得到 P 点的法线方向;
- 5) 判断法线方向一个像素范围内是否存在满足条件的特征点。若存在, 则该特征点为光条中心点, 取骨架下一行点, 重复步骤 1), 若不存在, 则取点 P 相邻点, 重复步骤 3)。

在提取完所有光条骨架点后, 结构光中心线提取流程结束。

3 实验分析

为验证改进方法的可靠性, 分别从提取效率、提取效果以及提取精度 3 个方面对改进算法进行实验分析。实验基于三角测量法的线结构光测量系统, 模拟实际应用场景, 选取地铁接触轨测试模型作为测量对象, 利用接触轨检测装置对模型进行试验。实验拍摄到的光带图像如图 1 所示。由于相机拍摄角度问题以及被测物拍摄面存在深度差, 导致 4 幅图中光带存在不同程度的偏折甚至断连现象。骨架的提取采用 ZHANG Z 并行快速细化法^[10], 提取效果如图 2 所示。

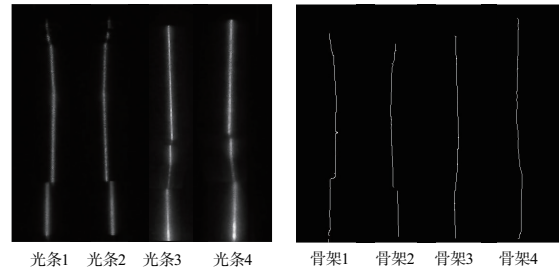


图 1 相机拍摄所得光条 图 2 光条细化所得骨架

3.1 提取效率分析

由于 Steger 算法运算量大, 将在该方法上所耗费的时间作为影响提取效率的指标, 比较传统 Steger 算法和本文改进 Steger 算法运算时间, 在 Steger 算法函数开始和结尾处增加计时函数, 记录运行时间, 改进方法除了记录递归算法运行时间外, 还需记录骨架细化的时间。在针对 Steger 法的优化上使得运算量越小, 运算时间越短, 实时性就越好。表 1 为两种算法对 4 种光条图像进行多次中心线提取所耗费的平均时间。

表 1 两种算法提取 4 幅图像中心线所耗时间对比
单位:ms

项目	耗时			
	光条 1	光条 2	光条 3	光条 4
原方法	231.20	232.60	423.01	645.22
改进方法	95.63	99.71	124.16	149.07

从表 1 可以看出,引入骨架后,在 Steger 法上所耗费的时长有了明显的缩减,提取光条 1 和 2 的中心线所花费时间减少了 58.6%和 57.1%;提取光条 3 和 4 中心线时间减少更为明显,分别减少了 70.6%和 76.9%。这主要是因为光条 3 和 4 像素点个数更多,在利用骨架对光条中心区域定位后,避免了边缘位置的像素点参与到运算当中,减少了计算量。为了验证骨架的定位效果,对两组递归算法进行运算次数的统计,其中一组引入骨架,另外一组不引入骨架,统计结果如表 2 所示。在引入骨架后,像素点参与运算的次数大幅减少,且光条 3 和光条 4 原本运算次数较多,在算法改进后,运算次数的减少尤为显著,因此在时间优化上的提升也更突出。

表 2 4 种光条像素点在两种算法中参与运算的次数
单位:次

项目	次数			
	光条 1	光条 2	光条 3	光条 4
未引入骨架	2 718	2 968	3 403	4 711
引入骨架	682	690	773	821

3.2 提取效果分析

光条 2、光条 3 中心线提取结果如图 3 所示。因为两种方法本质上都是利用海森矩阵在法线方向求取光条中心,可见除上下端部及中间偏折位置有明显区别外,其余区域无明显区别。为了进一步验证改进方法不仅能较少运算量,还能保证中心线的提取与原方法相同,采用图像相减法验证。

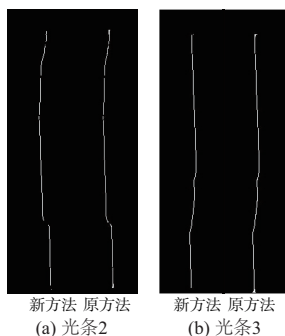


图 3 新老方法提取结果对比图

图 4 为经过相减函数得到的结果图,二者的区别主要表现在端部和光条有明显中断的位置。中断处存在差别是因为原图像偏折位置存在中断导致骨架存在中断,中断位置无法提取中心点,所以改进方法更符合实际情况;端

部位置则是由于该处结构光离散度大,传统算法会提取出多个符合条件的中心点,这也是传统算法存在的一个问题。此外端部和中断位置点都不是检测后续转换计算的目标点,因此改进方法所求中心线符合提取要求。



图 4 新老方法结果相减图

3.3 提取精度分析

以光条 3 在两种方法处理下得到的光条中心线为分析对象,在中心线不同位置提取 10 组对应点,分析改进方法的提取精度,对应点的坐标值及误差值如表 3 所示。

表 3 两种算法所提取 10 组对应点的坐标值及误差
单位:像素

原方法		改进方法		误差	
x	y	x	y	x	y
756.22	290.98	756.14	290.95	0.08	0.03
758.86	350.92	758.81	350.97	0.05	0.05
759.24	401.04	759.35	401.09	0.11	0.05
762.37	479.01	762.27	478.94	0.10	0.07
759.26	529.92	759.21	529.95	0.05	0.03
760.29	554.74	760.21	554.67	0.08	0.07
758.82	567.90	758.89	567.96	0.07	0.06
753.53	616.01	753.41	616.09	0.12	0.08
753.94	655.28	754.02	655.19	0.08	0.09
754.77	682.08	754.82	682.11	0.05	0.03

通过观察表 3 可发现,10 组对应点在 x 或 y 方向坐标差值在 0.1 像素左右。计算后求得 x 方向的 RMS 误差为 0.085,y 方向的 RMS 误差为 0.063,说明改进方法在利用高斯滤波器简化运算过程中并未造成严重的精度损失,两种方法提取精度接近。

4 结语

在地铁接触轨与运行轨几何参数检测的实际应用中,针对检测需满足实时性的要求,提出结合 IIR 高斯滤波和定位骨架方法,对现有仍存在运算量大的自适应线宽的 Steger 法进行改进。该算法先利用光条骨架对光条中心区域进行定位,再利用高斯滤波器的递归算法简化传统 Steger 算法的高斯卷积运算,实现光条中心线的快速提取。实验结果表明:该算法能有效减少 Steger 法的运算时间,同时能提取得到与原方法相同的光带中心,具有良好的测量精度,能够帮助检测系统实现实时检测的功能。

(下转第 106 页)

- 计[J]. 电子技术与软件工程,2020(10):94-96.
- [4] 谢光强,陈俊宇,郭小全. 基于SDG的集群打印系统故障智能诊断研究[J]. 广东工业大学学报,2020,37(4):15-20.
- [5] 潘志强. 3D打印技术的发展及应用分析[J]. 石河子科技,2020(6):36-37.
- [6] 赵宏伟. 基于FDM技术3D打印控制系统的研究与设计[D]. 廊坊:北华航天工业学院,2020.
- [7] VAZ V M, KUMAR L. 3D printing as a promising tool in personalized medicine[J]. AAPS PharmSciTech, 2021, 22(1): 1-20.
- [8] 周楠. 计算机辅助工业设计与3D打印技术初探[J]. 科技风, 2021(2):13-14.
- [9] 刘智,赵永强. 3D打印技术设备的现状与发展[J]. 锻压装备与制造技术,2020,55(6):7-13.
- [10] 刘长华,张卫华,甄潇杨,等. 基于3D打印设备的机械与控制系统设计研究[J]. 机械研究与应用,2020,33(6):123-128.
- [11] 万海鑫. 3D打印技术在创客培养领域的运用[J]. 无线互联科技,2020,17(24):104-105.
- [12] 吕文艳. 3D打印云平台体系架构及其关键技术研究[J]. 数字技术与应用,2020,38(12):56-58.
- [13] 武瑞刚,韩利萍,楚蓓蓓,等. 3D打印技术在航天企业的应用[J]. 机械工程与自动化,2020(6):225-226.
- [14] 蒋龙,姚晓彤. 浅析3D打印成形方法及在机械加工制造中的优势[J]. 内燃机与配件,2020(23):112-113.
- [15] 王大成,朱云阳. 浅析3D打印技术在航空制造中的应用[J]. 中国新技术新产品,2020(23):35-37.

收稿日期:2021-02-22

(上接第68页)

参考文献:

- [1] 孟庆林,谷森,唐飞扬,等. 基于线激光传感器的客车轮廓三维测量方法[J]. 机械制造与自动化,2020,49(6):210-212.
- [2] 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.
- [3] 贺俊吉,张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(7):593-597.
- [4] 雷海军,李德华,王建永,等. 一种结构光条纹中心快速检测方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2003,31(1):74-76.
- [5] 孙军华,王恒,刘震,等. 钢轨磨耗动态测量中激光光条中心的快速提取[J]. 光学精密工程,2011,19(3):690-696.
- [6] 占栋. 线结构光视觉测量关键技术及在轨道交通巡检中应用[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [7] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2):113-125.
- [8] LI B C, MA S D. Approximation of an arbitrary filter and its recursive implementation [J]. Pattern Recognition, 1994, 27(12):1767-1774.
- [9] YOUNG I T, VAN VLIET L J. Recursive implementation of the Gaussian filter[J]. Signal Processing, 1995, 44(2):139-151.
- [10] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.

收稿日期:2022-02-18

(上接第84页)

- [3] 崔文夏,张瑞亮,张波. 无同步器式变速器啮合套与接合齿圈啮合性能研究[J]. 机械传动,2019,43(11):150-155.
- [4] 高俊鹏,姜涛,张桂林. 一种ABS齿圈参数检测系统误差校正方法研究[J]. 计量学报,2019,40(2):201-207.
- [5] 李肖,冯志鹏. 行星齿轮箱齿轮组合故障振动频谱特征[J]. 振动与冲击,2020,39(1):15-23.
- [6] 韩军,王静,段荣鑫,等. 工艺参数对齿圈插齿加工切削力的影响规律研究[J]. 机床与液压,2020,48(17):126-129.
- [7] 贾康,张银行,南凯刚,等. 螺旋内齿圈拉刀精切齿磨削方法研究[J]. 机械工程学报,2020,56(7):220-230.
- [8] 王成龙,周建星,孙文磊,等. 行星齿轮传动柔性齿圈齿根动应力计算及光纤光栅检测方法[J]. 西安交通大学学报,2020,54(6):122-132.
- [9] 高洪,徐田恬. 基于神经网络的汽车齿圈锻压工艺优化[J]. 热加工工艺,2020,49(23):100-103.
- [10] 汪正兵,阮瑞杰,米艳军,等. 42CrMo钢齿圈毛坯的水-空交替控时淬火工艺[J]. 金属热处理,2019,44(9):169-173.
- [11] 关亚彬,杨小辉,方宗德,等. 一种鼓形齿联轴器的侧隙设计方法[J]. 西安交通大学学报,2019,53(7):136-143.
- [12] 张晓东,杨林,张毅,等. 基于流体压力渗透法的齿形滑环组合密封有限元分析[J]. 润滑与密封,2019,44(12):12-17,95.
- [13] 郭佳栋,蒋劲,孙强强,等. 外啮合直齿齿轮泵的耳型浮动套筒参数优化[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(4):289-295.
- [14] 马辉,段田堂,孙衍宁,等. 齿顶修形行星轮系啮合刚度分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(3):380-385.
- [15] 李铭,魏毅,李幼简,等. FOM-EP型板簧淬火生产线的辅助机器人技术[J]. 金属热处理,2019,44(7):207-210.
- [16] 莫易敏,杨君健,王玥琦,等. 装炉方式对等高齿热处理畸变一致性的影响研究[J]. 机械传动,2019,43(6):106-111.

收稿日期:2021-10-28