

基于 SIFT 的小模数齿轮图像亚像素级配准研究

朱维斌, 李继哲, 叶树亮

(中国计量大学工业与商贸计量技术研究所 杭州 310018)

摘要:为解决小模数齿轮视觉测量中凸显的工业相机高空间分辨率与大视场相互制约的问题,对轮廓光条件下前景背景对比度过强、局部对比度不足,存在大面积同色区域的小模数齿轮图像亚像素级配准方法进行研究。针对传统基于特征点的图像配准流程在小模数齿轮图像配准中存在特征点数量稀少、正确匹配率过低的问题,介绍了适用于小模数齿轮图像的配准流程;引入直方图均衡化改善图像对比度,丰富灰度色调,增强图像暗部特征以提升特征点数量和正确匹配率;为了克服传统匹配对提纯算法中阈值设置不准确、参数调整困难及模型不唯一的缺点,结合两倍中误差准则提出全局自适应参数匹配点对提纯方法,保证提纯结果唯一性的同时,其自适应调整判别阈值的方法可避免人为误差进而保证结果的重复性。实验结果表明,利用介绍的方法对图像进行预处理可大幅度提升特征点数量与正确匹配率,取提纯所得平移量的平均值作为配准结果,其正确度和精密程度均优于传统算法,针对轮廓光条件下的小模数齿轮图像,配准精度优于 0.083 pixel,对于小模数齿轮视觉测量具有实际应用价值。

关键词: 视觉测量;小模数齿轮;图像配准;全局直方图均衡化;两倍中误差准则

中图分类号: TP391 TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on sub-pixel registration of fine-pitch gear image based on SIFT

Zhu Weibin, Li Jizhe, Ye Shuliang

(Institute of Industry and Trade Measurement Technique, China University of Metrology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problem of mutual restriction between high spatial resolution and large field of view of industrial cameras prominently protruded in the visual measurement of fine-pitch gear, this paper studies on the sub-pixel image registration method for fine-pitch gear that has strong foreground-background contrast, insufficient local contrast and large area of the same color under rimming light condition. Aiming at the problem of less feature points and low correct matching rate in the image registration process based on feature points in fine-pitch gear image registration, the registration process suitable for fine-pitch gear image is described in this paper, the global histogram equalization is introduced to improve image contrast, enrich grey level and enhance the feature information in dark part of the image, so that the number of feature points and correct matching rate are improved. In order to overcome the deficiency of incorrect threshold setting, parameter adjustment difficulty and model nonuniqueness of traditional matching pair purification algorithm, combining with 2σ criterion, the global self-adaptive parameter matching point pair purification algorithm is put forward, which not only ensures the uniqueness of the purification result, but also adjust the judgment threshold adaptively to avoid artificial error and ensure the repeatability of result. Experiment results show that the number of feature points and correct matching rate are greatly increased when the image is preprocessing with the method described in this paper. Besides, the registration result measured by the average of translation amount purified with the method described in this paper outperforms that of the traditional method in correctness and precision. Aiming at the fine-pitch gear image under rimming light condition, the registration precision is better than 0.083 pixel, which has great practical application value for the visual measurement of fine-pitch gear.

Keywords: vision measurement; fine-pitch gear; image registration; global histogram equalization; 2σ criterion

0 引言

小模数齿轮通常指模数小于1 mm的齿轮,其高精度制造以及测量对传动装置的精度与可靠性起到决定性作用。小模数齿轮视觉测量利用图像作为检测和信息传递的手段和载体,克服了接触法测量对齿槽宽、传感器探头等硬件的尺寸要求,采用机器视觉实现快速、精确的无损检测是小模数齿轮检测领域的研究热点^[1-2]。视觉测量系统受电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)尺寸和空间分辨力的限制,通常难以实现对被测对象的完整成像。图像配准是解决面阵式CCD大视场和高空间分辨力矛盾的有效手段,其精度将直接影响最终检测结果的优劣。

基于特征的配准算法利用两幅待配准图像中冗余区域特征的一致性实现图像配准。图像特征种类繁多催生出多种多样的配准算法,利用图像局部区域作为特征的图像配准算法由于其实现简单,在图像配准发展初期应用广泛,但其只能应用于平移变换,且计算量大、误匹配率高。1995年Li H等人^[3]利用图像中完整的闭合轮廓特征实现了多传感器图像配准;2003年大连理工大学的封靖波等人^[4]提出基于相似曲线的配准算法,之后随着各种各样角点提取算法的提出,基于Harris、Moravec、SUSAN、Forstner等角点匹配的配准算法迅速发展。中国科学院樊志华等人^[5]结合Harris和相位相关提出新的配准算法,显著地提高了偏移量的估计精度。另一方面,尺度空间思想早在1926年由Iijima T提出,后经Witkin A. P.和Koenderinkde J. J.推广,在计算机视觉领域得到了广泛使用。1984年,基于拉普拉斯金字塔的配准算法被Burt P. J.^[6]首次提出,Lowe D. G.^[7-8]提出并完善尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT),Mikolajczyk K和Schmid C于2005年通过实验证明了SIFT描述子性能最优,基于SIFT的配准算法成为图像配准领域的主流方法^[9-10],针对性的SIFT改进算法也不断被提出^[11-12],包括利用主元分析代替直方图统计的主元分析尺度不变特征变换(principal component analysis scale invariant feature transform, PCA-SIFT)^[13]、利用全局信息代替局部信息而产生的全局尺度不变特征变换(global scale invariant feature transform, GIFT)^[14]、为了克服SIFT提取彩色图像特征时的缺陷而产生的彩色尺度不变特征变换(colored scale invariant feature transform, CSIFT)^[15]、针对强仿射变换所改进的仿射尺度不变特征变换(affine scale invariant feature transform, ASIFT)^[16]以及Bay H等人^[17]提出的加速鲁棒性特征(speeded-up robust features, SURF),2013年Wu J等人^[18]对SIFT及多种改进算法做了对比研究,证明SIFT在针对具有刚体变

换的图像配准中性能最优。虽然几十年来国内外学者在图像配准领域进行着不断深入的算法研究,但是对于工业零部件视觉检测中所需的针对性图像配准技术却鲜有涉及。

本文以小模数齿轮为视觉检测对象,针对轮廓光条件下齿轮图像前景背景对比度过强、局部对比度不足、存在大面积同色区域等问题,进行针对性、适用性的配准算法研究。通过引入直方图均衡化增强图像,提升图像暗部对比度,增强齿轮表面痕迹特征从而增加SIFT特征点数量;针对传统算法在匹配对提纯中存在的参数选择困难、模型不唯一以及阈值设置不准确现象,结合两倍中误差准则提出全局自适应参数匹配对提纯方法,无需人为干涉,避免人为误差。实验证明本文所阐述的方法能有效地增加小模数齿轮图像特征点数量并显著的提升匹配正确率;全局自适应参数匹配对提纯方法可保证提纯结果的唯一性与配准结果的准确性,直接取提纯所得平移量的均值作为变换模型参数估计的结果,实验其正确度和精密度均优于传统算法。本文研究成果为小模数齿轮视觉测量提供了有效的保证,在工业零部件视觉检测领域具有一定的实用性和应用价值。

1 基于特征点的配准算法

1.1 基于特征点的配准算法流程

基于特征点的图像配准技术是图像配准领域的主流方法,算法将图像固有特征浓缩在图像特征点及其特征描述符中,利用待配准图像互匹配特征点间的几何变换关系代替待配准图像间的变换关系。基于特征点的图像配准流程通常包括特征提取、特征匹配、变换参数模型估计3个环节。特征提取的目的是搜索并提取图像中稳定的特征点,利用特征点及其特征描述符充分表达图像特征。SIFT是一种提取图像局部特征点的机器视觉算法,SIFT特征对平移、旋转、尺度缩放具有良好的不变性,且具有独特性、多量性、可扩展性等优点。

特征匹配是利用特征描述符寻找参考图和搜索图两者特征的对应关系,可视为最优搜索问题。SIFT算法给每个特征点构建一个128维的向量作为其特征描述符,因此SIFT特征匹配的实质就是向量匹配。常用的匹配算法是基于K最近邻(k-nearest neighbor, kNN)算法的最近邻与次近邻距离比值法(nearest-neighbor with distance ratio, NNDR)。

1.2 齿轮图像的配准算法流程

基于机器视觉的小模数齿轮测量系统通常采用轮廓光保证边缘锐利以便进行更准确的边缘检测,由于只有极其微弱的反射光及环境光照射到齿轮表面,造成图像

的前景和背景对比度过于强烈,齿轮表面对比度非常低,细节部分模糊不清,图像中存在大面积同色区域,灰度分布呈现两极化状态,如图1所示。

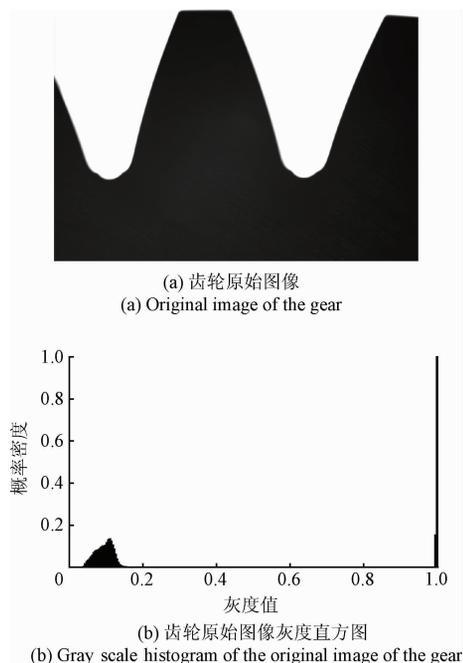


图1 原始图像及其灰度直方图

Fig. 1 Original image and its gray scale histogram

图1(a)所示为工业相机获取的小模数齿轮原始图像,其灰度直方图如图2(b)所示,图像的灰度分布不均匀,背景的灰度值高度集中在最大值附近,前景的灰度值聚集在灰度小于0.2的区域内,灰度值连续。其反映的图像信息就是背景由于曝光过度导致亮度极高,前景由于曝光不足导致亮度极低,图像灰度色调单一,存在大面积同色区域。虽然SIFT通过引入尺度空间成功实现了特征点的多量性,但对与此类局部细节对比度严重不足的图像,构建高斯差分金字塔(difference of gaussian, DOG)时的高斯平滑以及特征点精确定位时对低对比度特征点的剔除,导致齿轮表面细节部分提取不到稳定的特征点。对小模数齿轮原始图像进行特征点提取与特征点匹配,其结果如图2所示。

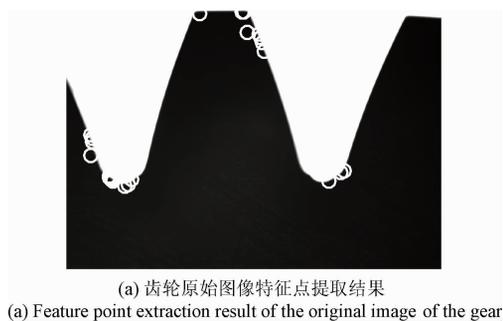


图2 齿轮原始图像特征点提取与匹配结果
Fig. 2 Feature point extraction and matching results of the original image of the gear

如图2所示,稳定的特征点只存在于灰度变化强烈的边缘附近区域,其匹配情况也并不理想。经统计,尺寸为 $1\ 944 \times 2\ 592$ 的原始图像仅得到37个特征点,经NNDR初匹配得到16对匹配对,但其中仅有3对正确匹配,正确匹配率只有18.75%,其原因主要是图像灰度色调单一,以致不同特征点的特征描述符非常相近,出现“一对多”和“多对一”的情况。

针对基于特征点的图像配准在小模数齿轮视觉检测中存在的上述问题,本文引入全局直方图均衡化增强原始图像,扩展像素灰度值的动态范围,提高暗部对比度,丰富其灰度色调,使图像细节更加清晰,以提升特征点数量,并使特征描述符更具独特性,避免“一对多”和“多对一”现象,提高正确匹配率。

2 面向特征点提取的图像增强算法

直方图修正是常用的图像增强技术,利用直方图能够表示图像中具有某种灰度级的像素个数,反映了图像各级灰度出现的频率。全局直方图均衡化(global histogram equalization, GHE)基本思想是根据整幅图像的灰度概率分布确定对应的输出灰度值,通过扩展图像的动态范围提升图像对比度。

若原图像任一灰度级归一化为 r ,变换后的图像任一灰度级归一化为 s ,显然 r, s 应满足以下条件:

$$0 \leq r \leq 1; 0 \leq s \leq 1 \quad (1)$$

因此,直方图修正的变换过程即:

$$s = T(r) \quad (2)$$

式中: $T(r)$ 为变换函数。为了保证灰度级从黑到白的次序以及变换后的像素灰度级仍在允许范围内, $T(r)$ 应满足下列两个条件:

1) $T(r)$ 在 $0 \leq r \leq 1$ 区域内是单值函数,且单调增加;

2) $T(r)$ 在 $0 \leq r \leq 1$ 区域内满足 $0 \leq T(r) \leq 1$ 。

假设原图像和直方图修正后的图像灰度级概率密度函数(probability density function, PDF)分别用 $p_r(r)$ 和

$p_s(s)$ 表示,则 $p_s(s)$ 可由下式求得:

$$p_s(s) = \left[p_r(r) \frac{dr}{ds} \right]_{r=T^{-1}(s)} \quad (3)$$

利用直方图修正进行图像增强的本质就是通过控制变换函数 $T(r)$ 改变图像灰度级的概率密度函数。

对于连续图像,直方图均衡化的变换函数为:

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(r) dr \quad r \in [0, 1] \quad (4)$$

式(4)右端即累积分布函数(cumulative distribution function, CDF),对 r 求导可得:

$$\frac{ds}{dr} = p_r(r) \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),可得:

$$p_s(s) = \left[p_r(r) \frac{1}{p_r(r)} \right]_{r=T^{-1}(s)} = 1 \quad s \in [0, 1] \quad (6)$$

式(6)表明,经过 $T(r)$ 变换后的图像,其概率密度函数是均匀的,对于图像增强来讲,相当于通过 $T(r)$ 变换扩展了像素的动态变换范围,改善图像对比度。

数字图像是对连续图像的采样和量化,设数字图像的尺寸是 $M \times N$,其灰度级范围为 $[0, L-1]$, r_j 为第 j 级的灰度,如在图像中灰度级为 r_j 的像素个数为 n_j ,该数字图像的直方图为 $h(r_j) = n_j$,则其概率密度函数如下:

$$p_r(r_j) = \frac{n_j}{MN} \quad (7)$$

其变换函数为式(4)的离散形式:

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{MN} \quad (8)$$

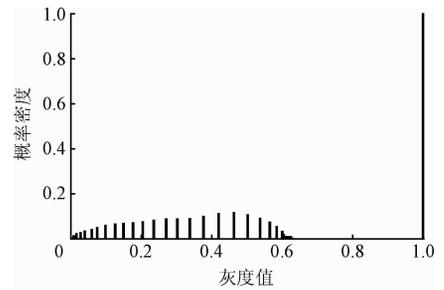
其中:

$$\begin{cases} 0 \leq r_j \leq 1 \\ k = 0, 1, \dots, L-1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: r_k 为原图像归一化灰度级, n_j 为原图像中出现第 j 级灰度级的像素个数, k 为图像中灰度级的总数, s_k 为全局直方图均衡化之后图像归一化灰度级, T 为变换关系式, $p_r(r_j)$ 为原图像取第 j 级灰度值的概率。利用全局直方图均衡化对小模数齿轮图像进行图像增强,增强后的齿轮图像及其灰度直方图如图3所示。



(a) 全局直方图均衡化结果
(a) The global histogram equalization result

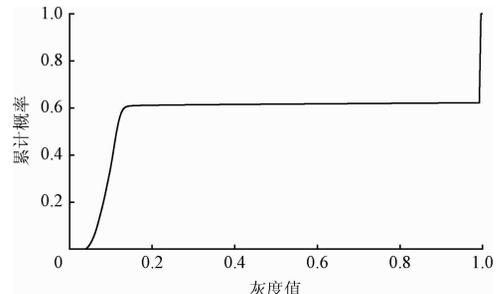


(b) 全局直方图均衡化后图像灰度直方图
(b) Gray scale histogram of the image after global histogram equalization

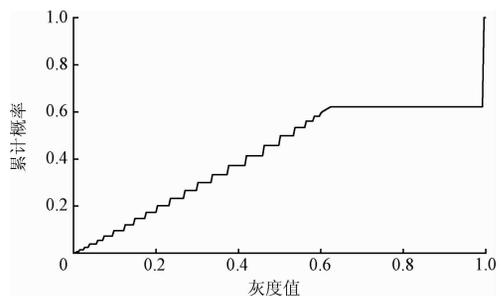
图3 直方图均衡化后的齿轮图像及其直方图
Fig.3 Fine-pitch gear image and its gray scale histogram after global histogram equalization

图3表明通过对原始图像进行直方图均衡化,将每一个 $T(r_k)$ 划归为与之最靠近的量化级,图像中齿轮区域像素灰度值低,经过直方图均衡化后,被提升到灰度较大的量化级,图像多个灰度级间的间隔被拉大,图像灰度值的动态范围得到扩展。而图像的背景区域灰度值极高,均衡化后仍处于灰度最大的量化级,从视觉效果来看,图像暗部和亮部处理效果并不相同,图像亮部无明显变化,图像暗部对比度得到提升,灰度色调更加丰富,齿轮表面所包含的信息大大增加,有利于提取更多的特征点。

直方图均衡化前后图像的灰度累积分布函数对比如图4所示。



(a) 原图像灰度累积分布函数
(a) Gray scale cumulative distribution function of the original image



(b) 直方图均衡化后灰度累积分布函数
(b) Gray scale cumulative distribution function after global histogram equalization

图4 灰度累积分布函数对比

Fig.4 Comparison of the gray scale cumulative distribution functions

由图4可以看出,原图像灰度累计分布函数在灰度小于0.2的区域骤增,在其后很大的灰度范围内保持不变,直方图均衡化之后,灰度累积分布函数曲线在灰度小于0.6的区域稳步递增,表明其灰度分布得到扩展并基本满足均匀分布。直方图均衡化后特征点提取与匹配结果如图5所示。

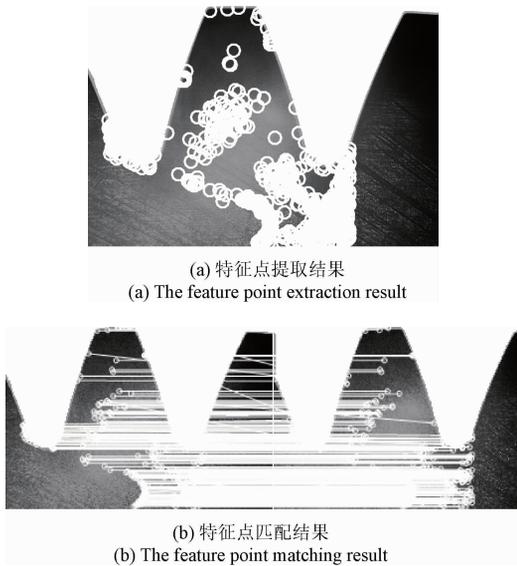


图5 直方图均衡化后特征点提取与匹配结果
Fig.5 The feature point extraction and matching results after global histogram equalization

对比图2和5,全局直方图均衡化前后特征点提取和匹配结果大相径庭。经过全局直方图均衡化后特征点数目、特征点匹配对及正确匹配率均有显著增加。统计数据显示特征点由37个增加至739个,正确匹配对由3对增加至195对,正确匹配率由18.75%提升至73.3%。

3 全局自适应参数匹配点对提纯方法

由图2(b)可知,NNDR初匹配结果中仍然存在误匹配对,影响配准结果的准确性,所以需要初匹配结果进行提纯。随机抽样一致性算法(random sample consensus, RANSAC)根据阈值把数据分为内点和外点,利用内点进行参数估计并剔除不准确点,是提纯的主流算法^[19-20]。RANSAC提纯算法依概率得出模型,本质是一种不确定算法,无法保证结果一定准确,数据集可能同时存在多个满足RANSAC条件的模型,因此RANSAC无法保证提取模型的重复性。针对具有平移变换关系的图像,也可以设置匹配对包括斜率和平移量在内的几何特征的阈值进行提纯,但人为设置阈值的不准确限制了提纯的准确性。

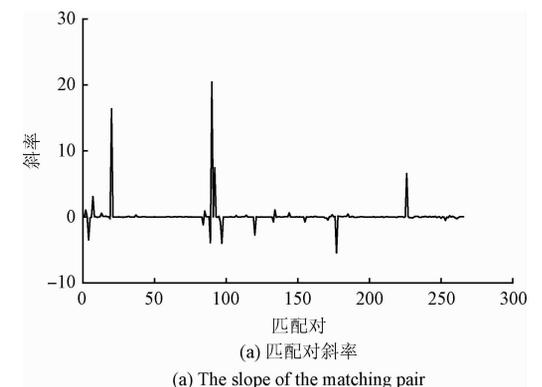
对于本文研究的基于特征点匹配的图像配准方法,

其每一对互相匹配的特征点都可视为对平移量的一次测量,故而 n 对特征点匹配对可视为对同一平移量的 n 次重复测量。对于多次等精度重复测量结果,两倍中误差准则是判别并剔除粗大误差的重要手段。

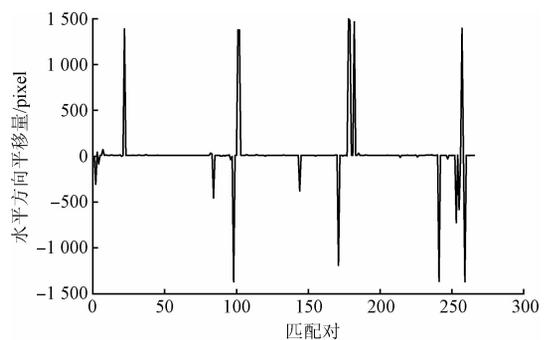
两倍中误差准则认为对于某一测量列,其残余误差落在 $\pm 2\sigma$ 以内的概率约为95.44%,如果在测量列中有残余误差绝对值大于 2σ 的测量值,则可以认为它含有粗大误差,应予以剔除。本文引入两倍中误差准则提出全局自适应参数匹配点对提纯方法。假设初匹配得到匹配点对集 φ ,计算匹配对斜率的残差与中误差,利用两倍中误差准则判断粗大误差,并剔除残差绝对值的最大值所对应的匹配对,更新均值、残差和中误差,重新寻找粗大误差并剔除,循环此过程直到所有斜率数据的残差均小于两倍中误差,得到斜率满足要求的匹配点集 φ_1 ,然后按照上述过程对 φ_1 中水平方向平移量进行误差判别与剔除,得到斜率与水平方向平移量均满足要求的匹配点集 φ_2 ,最后对 φ_2 按照上述过程判别并剔除垂直方向平移量的粗大误差,得到准确的匹配点集 φ_3 ,完成特征点匹配对提纯的整个过程。

两幅待配准图像经NNDR得到的初匹配点对斜率、水平方向平移量、垂直方向平移量的数据如图6所示。

由图6可知,无论是水平方向平移量、垂直方向平移量或是两点连线的斜率,均有部分计算结果属于粗大误差,应予以剔除。首先剔除斜率粗差对应的匹配点对,剔除后的匹配对信息如图7所示。



(a) The slope of the matching pair



(b) Horizontal translation amount

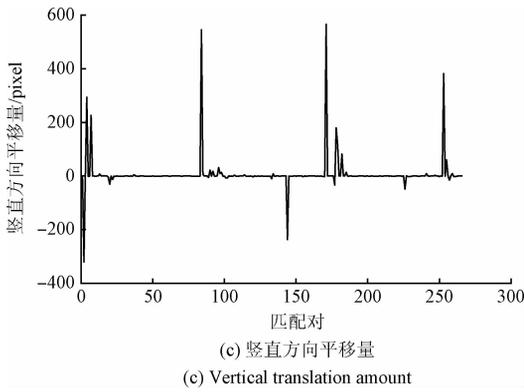


图6 NNDR 匹配结果

Fig. 6 The matching result using NNDR

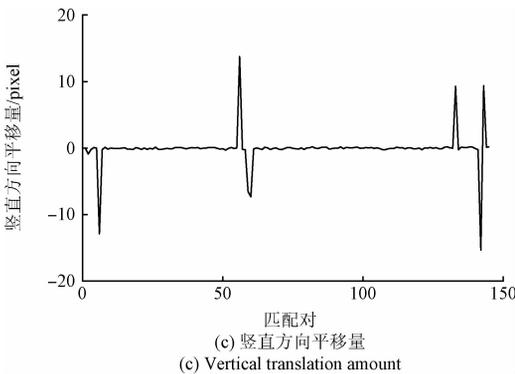
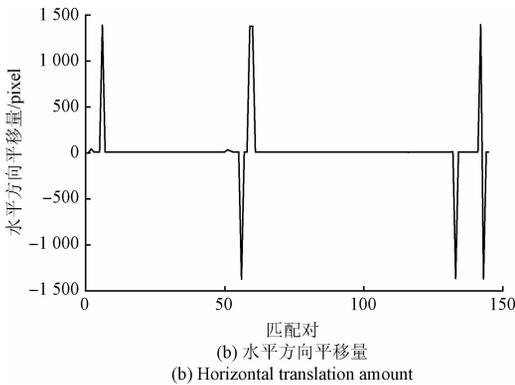
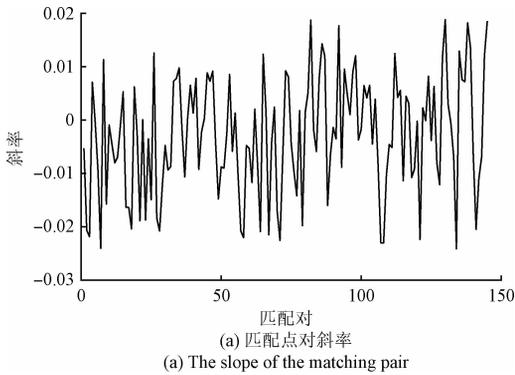


图7 剔除斜率粗大误差结果

Fig. 7 The result after eliminating the gross error of the slope

对比图6与7可知,依据斜率进行匹配对提纯后,数据波动范围明显减小,匹配点对斜率波动范围从(-10, 25)缩减到(-0.025, 0.02), 竖直方向平移量的波动范围从(-400, 600)缩减到(-20, 15), 水平方向平移量波动范围虽未见明显变换, 但大误差点有所减少。但依据斜率进行匹配对提纯后, 仍然存在斜率满足要求但平移量失准的误匹配对, 因此需要在此基础上依据水平方向平移量再一次进行匹配对提纯, 其效果如图8所示。

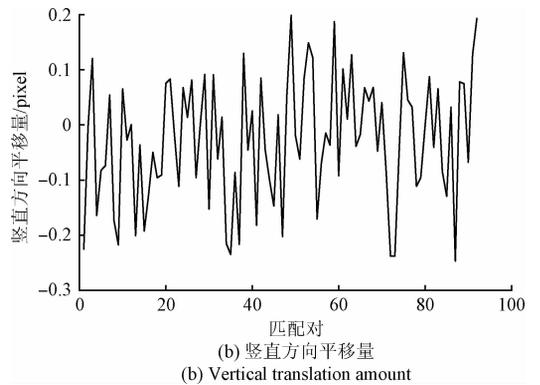
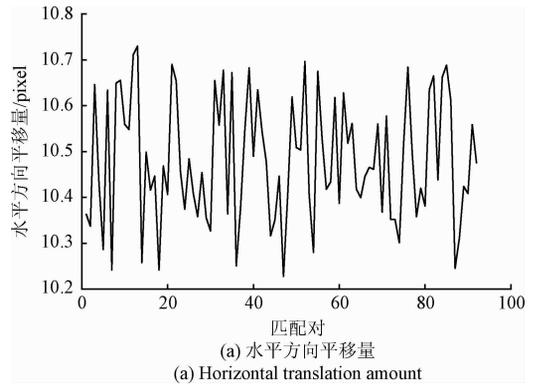


图8 剔除水平方向平移量粗大误差结果

Fig. 8 The result after eliminating the gross error of the horizontal translation amount

对比图7和8可知,先后依斜率、水平方向平移量对特征点匹配对进行提纯后,水平方向平移量数据波动范围减小到(10.2, 10.8), 竖直方向平移量波动范围缩减到(-0.3, 0.2)。此时,需要依据竖直方向平移量对匹配对进行提纯, 计算结果表明此时竖直方向平移量残差绝对值的最大值为0.021 5, 两倍中误差为0.021 6, 即竖直方向偏移量已无粗差存在, 无需剔除。至此, 提纯过程结束, 3组数据均已没有大误差点存在。引入方差作为斜率及平移量数据稳定性的评价依据, 全局自适应参数特征点匹配对提纯过程中数据方差如表1所示。

表1 匹配对提纯过程中斜率与平移量数据方差

Table 1 The variances of the slope and translation amount in the purification process of the matching pair

匹配对信息	初始	提纯	提纯水平
	匹配	斜率后	平移量后
斜率方差	3.316 0	0.000 1	0.000 1
水平方向平移量方差/pixel	85 056	91 945	0.018 2
竖直方向平移量方差/pixel	41 782	5.985 0	0.012 8

由表1可知,利用本文所述方法对特征点匹配对进行提纯,数据稳定性获得显著提高。综上所述,本文提出的全局自适应参数匹配点对提纯方法,可以成功实现特征点匹配对提纯。

4 实验结果与分析

实验用小模数齿轮视觉测量系统如图9所示。

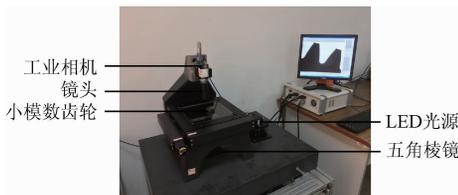


图9 小模数齿轮视觉测量系统

Fig. 9 The vision measurement system for fine-pitch gear

如图9所示,小模数齿轮视觉测量系统采用轮廓光照明方式,光源水平放置于隔震台,利用五角棱镜使光线竖直向上,透过光学玻璃板为系统提供光源。系统选用Baumer相机EXG50,分辨率为 $1\,944 \times 2\,592$,CCD靶面尺寸为 $1/2.5''$,搭配放大倍率为两倍的双侧远心镜头,可获得尺寸为 $2.15\text{ mm} \times 2.88\text{ mm}$ 的视场,由于被检齿轮零件分度圆直径为 40 mm ,故小模数齿轮视觉测量系统单次采集仅能获取齿轮局部图像。实验利用本系统采集所得小模数齿轮图像,在 $(0,301)$ 区间中随机选择12个平移量,利用计算机模拟的方法生成12组具有不同亚像素级平移量的图像。首先对小模数齿轮图像进行直方图均衡化,验证本文所述图像增强方法在增加特征点数目、提升正确匹配率方面的作用,统计信息如表2、3所示。

由表2、3可知,原始图像中至多可提取37个特征点,正确匹配率最高为29.4%。利用全局直方图均衡化增强原图后,至少可提取特征点596个,正确匹配率至少为63.2%。实验结果表明本文所述方法可显著增加特征点数目同时提升正确匹配率。

表2 原图像与增强图像特征点数目对比

Table 2 Comparison of the number of feature points of the original image and enhanced image (个)

实验组	特征点数目	
	原图	图像增强
1	37	739
2	22	690
3	20	710
4	20	596
5	27	1 062
6	18	731
7	8	1 301
8	37	623
9	26	630
10	12	690
11	30	801
12	29	671

表3 原图像与增强图像正确匹配率对比

Table 3 Comparison of the correct matching rates of the original image and enhanced image (%)

实验组	正确匹配率	
	原图	增强图像
1	15.4	73.2
2	18.75	73.3
3	18.75	76.8
4	15.0	81.6
5	29.4	77.2
6	22.0	63.2
7	7.1	71.7
8	9.1	70.5
9	8.3	82.1
10	7.7	69.1
11	10.1	74.2
12	19.7	80.3

其次,利用本文提出的自适应参数匹配点对提纯法对匹配对进行提纯从而计算变换模型参数,本文直接计算提纯所得平移量的平均值作为配准结果,比较其与RANSAC最优解的精度。利用RANSAC算法进行提纯时需要确定4个参数:置信概率 P 、误差容忍度 σ 、内点概率 t 、求解变换模型所需最小数据个数 n 。本文针对满足平移变换模型的图像进行配准,故取 $n=2$,为保证结果的可信度并结合实际所需的配准精度,取 $P=0.99$, $\sigma=0.1$ 。内点概率 t 需要依据先验值并结合实验情况确定。经实验验证,取 $t=0.2$ 时效果最佳。故本实验中参数设置为 $P=0.99$, $t=0.2$, $\sigma=0.1$, $n=2$ 。首先统计所有实验组中RANSAC估计得到的全部模型数量,如表4所示。

表4 实验组 RANSAC 模型数量统计

Table 4 Data statistics of the number of RANSAC model in the experiment (个)

实验组	模型数	实验组	模型数
1	1	7	2
2	6	8	1
3	2	9	11
4	3	10	7
5	1	11	4
6	2	12	2

由表4可知,对满足平移变换模型的小模数齿轮图像进行配准时绝大部分情况下匹配对中存在着多个RANSAC估计模型,极大地影响了配准结果的可靠性。本文选择误差最小的模型作为RANSAC最优解,利用最大误差和均方误差(mean squared error, MSE)比较其与本文配准结果的正确度和精密度,统计结果如表5、6所示。

表5 本文所述方法与 RANSAC 最优解误差对比

Table 5 Error comparison between the described method and optimal solution of RANSAC (pixel)

实验组	本文配准结果	RANSAC 最优解
1	-0.001 1	0.020 6
2	-0.031 1	0.080 0
3	0.013 9	0.066 6
4	-0.063 3	0.119 9
5	0.004 6	0.014 6
6	0.042 3	0.048 6
7	-0.034 6	0.123 4
8	-0.062 5	0.115 8
9	0.052 9	0.070 0
10	0.029 4	-0.050 1
11	0.001 1	-0.014 8
12	0.082 6	0.087 0

表6 配准结果正确度与精密度对比

Table 6 Comparison of the correctness and precision of registration result between the described method and RANSAC (pixel)

方法	最大误差	MSE
RANSAC 最优解	0.123 4	0.006 0
本文配准结果	0.082 6	0.001 9

由表5、6可知,利用本文所述方法增强图像并对特征点匹配对进行提纯,最终得到配准结果的正确度和精密度均优于RANSAC最优解,最大误差不超过0.083 pixel。

5 结 论

本文针对轮廓光下条件下小模数齿轮图像配准中存在着特征点数量稀少、正确匹配率过低的问题,引入全局直方图均衡化扩展图像灰度值动态范围、提升局部对比度、丰富灰度色调,提升图像特征点数量和正确匹配率,针对传统特征点匹配对提纯方法存在着人为选择阈值不准确、参数调整困难及模型不唯一的问题,提出全局自适应参数匹配点对提纯方法,利用两倍中误差准则作为判别依据,自适应调整阈值完成匹配对提纯,方法简单有效,易于实现。实验结果表明利用本文所述方法可实现优于0.083 pixel的图像配准,配准结果正确度和精密度均优于传统RANSAC算法,具有较强的实际应用价值。

参考文献

[1] ALI M H, KUROKAWA S, UESUGI K. Application of machine vision in improving safety and reliability for gear profile measurement [J]. Machine Vision and Applications, 2014, 25(6): 1549-1559.

[2] 王文成. 基于机器视觉的齿轮参数测量系统设计[J]. 机械传动, 2011, 35(2): 41-43.
WANG W CH. Design of measurement system of gear parameter based on machine vision [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2011, 35(2): 41-43.

[3] LI H, MANJUNATH B S, MITRA S K. A contour-based approach to multisensor image registration [J]. IEEE transactions on image processing, 1995, 4(3): 320-334.

[4] 封靖波, 苏志勋, 刘秀平. 一种基于相似曲线的全景图自动拼接算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(11): 1604-1608.
FENG J B, SU ZH X, LIU X P. An Similar-curve based automatic mosaic algorithm of panoramic image [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(11): 1604-1608.

[5] 樊志华, 王春鸿, 饶长辉, 等. 基于Harris角点量与相位相关的亚像素级图像配准方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 788-791.
FAN ZH H, WANG CH H, RAO CH H, et al. High accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation of Harris strength [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(2): 788-791.

[6] BURT P J. The Pyramid as a structure for efficient computation [C]. Multiresolution Image Processing and Analysis, 1984: 6-35.

[7] LOWE D G. Object recognition from local scale invariant features [C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2002: 1150.

[8] LOWE D G. Distinctive image features from scale-

- invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):90-110.
- [9] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors[J]. IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intell., 2005, 27(10):1615-1630.
- [10] 邸男, 李桂菊, 陈春宁, 等. 结合归一化差分高斯特征的图像匹配技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6):585-590.
DI N, LI G J, CHEN CH N, et al. Image matching technology research based on normalized DOG features[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28(6):585-590.
- [11] 梁栋, 颜普, 朱明, 等. 一种基于 NSCT 和 SIFT 的遥感图像配准算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5):1083-1088.
LIANG D, YAN P, ZHU M, et al. Remote sensing image registration algorithm based on SIFT and NSCT [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5):1083-1088.
- [12] 韩超, 方露, 章盛. 一种优化的图像配准方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2):178-184.
HAN CH, FANG L, ZHANG SH. An optimized image registration algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2):178-184.
- [13] YAN K, SUKTHANKAR R. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors [C]. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004, 2(2):506-513.
- [14] MORTENSEN E N, DENG H L, SHAPIRO L. A SIFT descriptor with global context [C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005:184-190.
- [15] ABDEL-HAKIM A E, FARAG A A. CSIFT: A SIFT descriptor with color invariant characteristics [C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006:1978-1983.
- [16] MOREL J M, YU G. A SIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2):438-469.
- [17] BAY H, TUYTELAARS T, VAN G L. SURF: Speeded up robust features [J]. Computer Vision & Image Understanding, 2008, 110(3):404-417.
- [18] WU J, CUI Z, SHENG V S, et al. A comparative study of

SIFT and its variants [J]. Measurement Science Review, 2013, 13(3):122-131.

- [19] 傅卫平, 秦川, 刘佳, 等. 基于 SIFT 算法的图像目标匹配与定位[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1):163-169.
FU W P, QIN CH, LIU J, et al. Matching and location of image object based on SIFT algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(1):163-169.
- [20] 刘佳, 傅卫平, 王雯, 等. 基于改进 SIFT 算法的图像匹配[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5):1107-1112.
LIU J, FU W P, WANG W, et al. Image matching based on improved SIFT algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5):1107-1112.

作者简介



朱维斌, 2014 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为光栅信号处理和齿轮精密测量。
E-mail: zhuweibin@cju.edu.cn

Zhu Weibin received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2014. Now, he is an associate professor at China University of Metrology. His main research interest includes grating signal processing and high-precision gear vision metrology.



李继哲, 2015 年于中国计量大学获学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为高精度视觉测量。
E-mail: lijizhecn@foxmail.com

Li Jizhe received his B. Sc. degree from China University of Metrology in 2015. Now, he is a M. Sc. candidate in China University of Metrology. His main research interest focus on high-precision vision measurement.



叶树亮(通讯作者), 2005 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现为中国计量大学精密仪器专业教授, 主要研究方向为化工安全及工艺安全测试技术与仪器、零部件无损检测设备与仪器、光栅信号处理、齿轮精密测量。
E-mail: itmt_paper@126.com

Ye Shuliang (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2005. Now, he is a professor in precision instrument specialty and the head of Institute of Industry and Trade Measurement Technique, China University of Metrology. His main research areas are chemical product safety testing technology and instrument, nondestructive testing technology and instrument, grating signal processing and high-precision gear vision metrology.