

引用格式: 马天兵, 刘健, 杜菲, 等. 基于改进 Otsu 方法的振动图像分割研究[J]. 电光与控制, 2019, 26(2): 11-15, 31. MA T B, LIU J, DU F, et al. A vibration image segmentation algorithm based on improved Otsu threshold method[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(2): 11-15, 31.

基于改进 Otsu 方法的振动图像分割研究

马天兵, 刘健, 杜菲, 陈南南
(安徽理工大学, 安徽淮南 232001)

摘要: 在振动位移的机器视觉测量方法中, 振动处标记点图像的分割作为处理过程中的关键, 其分割结果直接影响最终的测量精度, 但由于标记点图像中目标像素数目过小的特点及测量干扰因素, 传统的 Otsu 阈值分割方法及相关改进算法的分割效果均不理想。为得到更优的分割算法, 首先探讨了相关改进算法分割脉冲噪声、强光及阴影干扰下标记点图像时存在的问题, 然后提出了一种基于阈值与目标波峰之间灰度分布信息的改进 Otsu 算法, 在相关改进算法的基础上, 将阈值与邻近目标波峰之间灰度值的差值及二者的像素数量之和在总体中的比例共同作为权重, 最后进行多幅复杂干扰情况下标记点图像的分割实验和振动位移测量实验, 实验结果表明, 改进的算法在干扰下依然能对标记点图像进行有效分割, 且目标的位置偏差值总体优于其他算法, 同时准确地实现了振动位移的测量。

关键词: 图像分割; 振动位移; 机器视觉; Otsu 阈值; 标记点

中图分类号: V271.4 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.02.003

A Vibration Image Segmentation Algorithm Based on Improved Otsu Threshold Method

MA Tian-bing, LIU Jian, DU Fei, CHEN Nan-nan
(Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In the method for the measurement of vibration displacement by way of machine vision, the segmentation of the marked image of vibration is the key point in the processing procedure. The segmenting result directly affects the final measurement accuracy. However, the segmenting results of the traditional Otsu threshold segmentation method and the improved algorithms are not satisfactory because of the small number of pixels of the target in the marked image and the interference factors in measurement. In order to get a better segmentation algorithm, this paper firstly explores the problems existing in the improved algorithms of segmenting the marked image under the interference of impulse noise, strong light and shadows. Then, an improved Otsu algorithm is proposed based on the distribution information of the gray level between the threshold and the target peak. Based on the improved algorithms, the ratio of the difference of the gray values between the threshold and the nearest target peak to the population, and the ratio of the sum of the pixel number of their gray values to the population, are both taken as the weight. Finally, the segmentation experiment of the marked image and the measurement experiment of vibration displacement are carried out under the condition of multiple and complex interference. Experimental results show that, the proposed algorithm is still able to effectively segment the marked image under interference, and the deviation of the target's position is lower than that of other algorithms in general. Meanwhile, the accurate measurement of vibration displacement is realized.

Key words: image segmentation; vibration displacement; machine vision; Otsu threshold; mark point

收稿日期: 2018-01-19

修回日期: 2018-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(51305003); 安徽省博士后基金(2017B172); 安徽理工大学国家自然科学基金(2016yz004)

作者简介: 马天兵(1981—), 男, 安徽合肥人, 博士, 教授, 研究方向为振动控制。

0 引言

机械振动作为工程领域中不可忽视的因素之一, 对其进行准确测量十分必要。现有的振动测量方法繁多, 且涉及不同的技术领域, 例如, 加速度传感器法^[1]

和压电法^[2],但此类接触式测量方法改变了被测物结构,特别对于柔性材料,存在较大误差;相比之下,利用机器视觉技术的非接触测量方法因准确度高、方便直观等优势受到越来越多的关注^[3]。振动位移的机器视觉测量方法需要首先在振动处进行标记,并利用相机采集振动时标记点的图像,然后处理振动图像得到被测物的振动位移^[4]。图像处理过程一般分为标定、分割、质心检测等步骤。其中,图像分割作为最关键的环节,能否准确迅速地从图像中分割出标记点特征,直接影响图像的后续图像分析和最终的处理结果。

在图像分割领域,基于阈值的分割方法一直以方便、高效等特点备受关注,其中,基于最大类间方差的 Otsu 法更是因分割效果良好被广泛应用于图像的阈值分割^[5]。但是,Otsu 法具有一定的局限性,对于灰度分布直方图不具备明显双峰特点的图像,Otsu 法对其分割准确性无法保障^[6],而上述非双峰特点的标记点图像,又因目标像素比例过小、直方图中存在大范围波谷等特点,Otsu 法往往无法进行有效分割。相关学者对 Otsu 法进行了许多研究和改进^[7-9],旨在使其能对更多类型图像进行准确分割。针对类似标记点图像的改进算法中,文献[10]考虑图像灰度直方图波谷不明显时,Otsu 法无法得到准确阈值的情况,提出将直方图中各灰度值的高度作为权重,加入 Otsu 阈值分割法类间方差的求解公式中,使得阈值向波谷处的灰度值趋近,突出了非双峰直方图分布的图像中分布概率低的波谷;文献[11]在此基础上,考虑目标与背景的方差,将灰度值邻域的高度之和作为权重,相对突出了图像灰度直方图中邻域分布概率较低的波谷,对目标与背景方差差距大的图像的分割效果较佳;文献[12]在上述基础上,考虑波谷与邻近波峰的相对高度差,并将其作为权重加入方差求解公式中,进一步突出了波谷,解决了目标相对于背景总体分布频率过小导致分割效果不理想的问题,并用脑部 MRI 图像验证其改进效果。

上述改进算法均在一定程度上改进优化了传统的 Otsu 法,也被证明可对类似标记点图像特征的图像进行有效分割。但是,在振动测量中,存在许多环境影响因素,例如相机噪声及光照影响,由于没有考虑干扰情况,改进的算法并不十分适用于实际振动测量中标记点图像的分割。为进一步改进算法,本文首先探讨相关改进算法对脉冲噪声、强光及阴影干扰下标记点图像的分割中存在的问题,针对问题提出在相关改进算法的基础上,考虑不同干扰对图像灰度值分布的影响,将波谷与邻近目标波峰之间灰度值的像素数量之和与总体的比值,以及波谷和邻近目标波峰灰度值的差值与总体的比值共同作为权重因子,加入 Otsu 的类间方

差计算公式中,使阈值结果更趋近于靠近目标的理想阈值。选取多幅复杂干扰情况下的标记点图像,利用不同算法对其进行分割,比较分割效果;并另外进行实际振动位移测量实验,对比振动位移的实验测量结果,以验证改进算法的抗干扰能力与准确性。

1 研究基础

1.1 Otsu 阈值分割法

Otsu 法是一种基于类间方差的阈值分割算法,基本原理如下。

一幅图像由 N 个像素点构成,其中存在 L 种灰度值,即灰度级为 L ,灰度值为 $l(0 < l < L)$ 的像素点有 n_l 个,将此信息绘制为直方图,即为图像的灰度值分布直方图,其中,横坐标为灰度值 l ,纵坐标是灰度值为 l 的像素点的数量 $h(l) = n_l$,而灰度值为 l 的像素点在图像中出现的比例为 $P(l) = n_l/N$ 。基于阈值的图像分割操作是选取 $t(0 \leq t \leq L-1)$ 中一个灰度值作为阈值,将图像分为灰度值小于等于 t 的 L_1 和大于 t 的 L_2 两部分,其中, L_1 和 L_2 像素总数分别为 $N_1(t) = \sum_{i=0}^t h(i)$, $N_2(t) = \sum_{i=t+1}^L h(i)$,占像素总数的比例分别为 $p_1(t) = \frac{N_1(t)}{N}$, $p_2(t) = \frac{N_2(t)}{N}$, L_1, L_2 内所有像素的灰度值总和分别为 $I_1(t) = \sum_{i=0}^t ih(i)$, $I_2(t) = \sum_{i=t+1}^L ih(i)$,所以, L_1, L_2 内均值分别为

$$\mu_1(t) = \frac{I_1(t)}{N_1(t)} \quad (1)$$

$$\mu_2(t) = \frac{I_2(t)}{N_2(t)} \quad (2)$$

同理,整幅图像的均值为

$$\mu = \frac{\sum_{i=0}^L ih(i)}{\sum_{i=0}^L h(i)} \quad (3)$$

所以,当阈值为 t 时,图像两类的类间方差为

$$\sigma_B^2 = p_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2 + p_2(t)(\mu_2(t) - \mu)^2 \quad (4)$$

将 t 遍历 $0 \sim L-1$,得到最大类间方差的 T 值作为 Otsu 法的最终阈值,即

$$T = \arg \max_{0 \leq t \leq L-1} \sigma_B^2 \quad (5)$$

利用传统 Otsu 法对标记点图像进行分割,本文图像均由 Imaging Source 品牌,DMK 33G618 型号的工业相机采集,图像规格为 480×640 ,分割结果如图 1 所示,其中,黑色区域为小于阈值的灰度值目标部分,白色区域为大于阈值的灰度值的背景部分,可以看出,此方法没有成功提取出目标。无干扰的情况下此法既然

已经出现严重偏差,本文便不再对其进行干扰下分割效果的探究。Otsu 法作为经典阈值分割算法,已被证明具有良好的分割效果,特别是针对灰度分布直方图为明显双峰的图像,但对于此类目标像素点过少的标记点图像,分割阈值严重偏向于像素占比大、类内方差大的背景区域,导致图像分割失败。

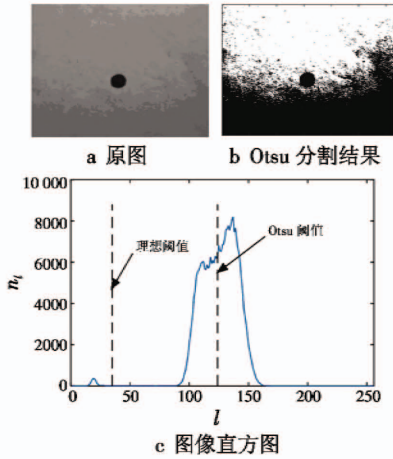


图 1 图像直方图及阈值分割结果

Fig. 1 Histogram and threshold segmentation result

1.2 其他改进 Otsu 阈值分割法

为了使得 Otsu 阈值分割法适应性更强,相关学者做了许多优化改进。文献[10]将灰度分布直方图中灰度值为阈值的像素出现概率作为权重因子加入算法进行改进,突出直方图的波谷,改进后的最大类间方差算式为

$$\sigma_B^2 = [1 - P(t)] [p_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2 + p_2(t)(\mu_2(t) - \mu)^2] \quad (6)$$

式中, $P(t) = n_t/N$, $P(t)$ 表示阈值为 t 的像素点数量占像素点总数的比例。改进后的算式相对加大了分布概率较低的阈值的类间方差,使得最终结果趋向于波谷处的阈值。

文献[11]在上述基础上,将灰度直方图中阈值邻域灰度值的所有像素的分布概率代替阈值灰度值像素的分布概率作为权重,改进后的最大类间方差算式为

$$\sigma_B^2 = [1 - \bar{P}(t)] [p_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2 + p_2(t)(\mu_2(t) - \mu)^2] \quad (7)$$

$$\bar{P}(t) = [P(t-k) + \dots + P(t-1) + P(t) + P(t+1) + \dots + P(t+k)] \quad (8)$$

$\bar{P}(t)$ 表示范围为 $(2k+1)$ 的阈值 t 邻域灰度值的所有像素的分布概率,进一步加重了波谷处的阈值的类间方差结果,减少了背景与目标之间较大的差异对结果的影响。

文献[12]在上述基础上,考虑波谷与邻近波峰的

相对高度,即波谷与波峰灰度值像素的相对分布概率差,并将其作为权重加入算式中,改进后的最大类间方差算式为

$$\sigma_B^2 = [1 - v(t)] [p_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2 + p_2(t)(\mu_2(t) - \mu)^2] \quad (9)$$

式中, $v(t) = \bar{P}(t) \frac{2P(t)}{P_L(t) + P_R(t)}$, $P_L(t)$ 和 $P_R(t)$ 分别表示阈值 t 最邻近左右波峰灰度值的像素分布概率,综合考虑了阈值邻域以及邻近波峰的相对高度,避免了目标分布比例较小对阈值选取的影响。

为探究上述改进算法对标记点图像以及干扰情况下的标记点图像的分割效果,选取不同规格的无干扰的标记点图像、10k 像素数量的脉冲噪声干扰下的图像、高强度干扰下的图像以及阴影干扰下的图像,利用上述算法分别进行分割,结果如图 2 ~ 图 5 所示,其中 N, F 和 S 方法分别指代文献[10-12]中的改进算法。

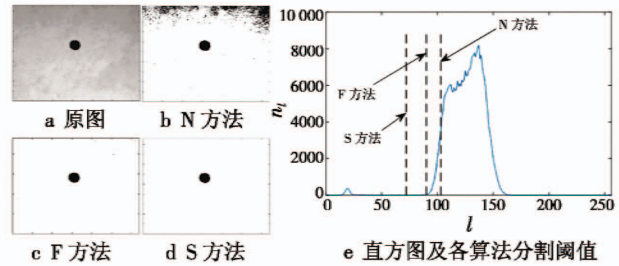


图 2 各算法对无干扰标记点图像的分割结果

Fig. 2 Threshold segmentation results of each algorithm for non-interference marked image

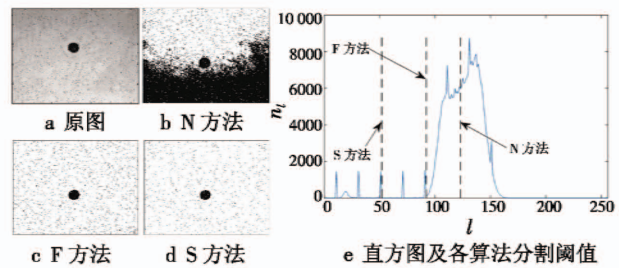


图 3 各算法对脉冲噪声干扰下标记点图像的分割结果
Fig. 3 Threshold segmentation results of each algorithm for marked image under impulsive noise interference

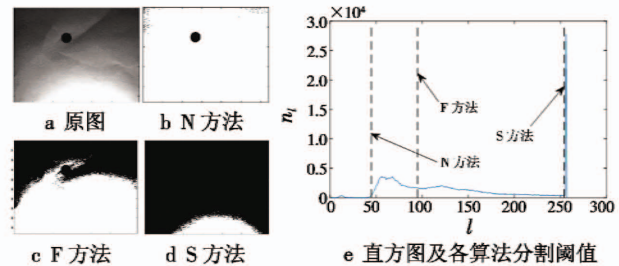


图 4 各算法对高强度光干扰下标记点图像的分割结果
Fig. 4 Threshold segmentation results of each algorithm for marked image under high-intensity light interference

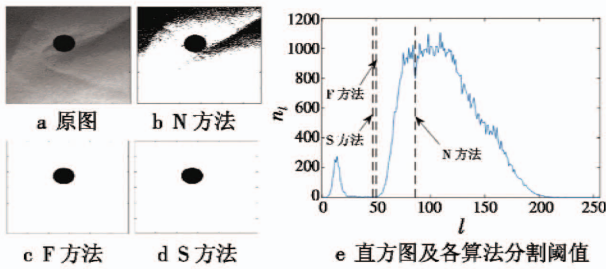


图5 各算法对阴影干扰下标记点图像的分割结果
Fig.5 Threshold segmentation results of each algorithm for marked image under shadow interference

由于N方法仅将灰度分布概率作为权重,而分布概率的影响一般远小于方差的影响,从图中可以看出,N方法在无干扰情况下的分割已经出现些许偏差,而在脉冲噪声和阴影干扰下的分割失效,但在强光影响下,由于突出峰处分布概率过大,分布概率在判断方差中占了主导地位,使阈值偏向于目标,较成功地分割出了目标;F方法将灰度邻域的概率作为权重,加大了波谷对判别式的影响程度,但是在强光干扰下的图像中,突出峰处在若干的灰度邻域中均有所偏重,以至于最终阈值偏向于背景的区域;S方法考虑了灰度邻域以及波谷与邻近波峰的相对高度,相当于在F方法上进一步加入波峰的相对高度影响,使结果更趋近于目标,从图中可看出,类似F方法,其他情况分割出了目标,但在强光干扰下,突出峰的波峰过大,导致得到的阈值直接定为强光处附近,分割失败。

2 改进算法

根据相关算法对不同图像的分割结果可知,提高标记点图像在不同干扰下的分割成功率,需要在保证无干扰分割成功的基础上,考虑其他干扰下的图像特点,着重考虑强光干扰下的情况。本文改进总体思路为加大N方法中分布概率的影响,避免F和S方法中突出峰的影响,具体思路为:引入灰度直方图中阈值与目标波峰之间的像素分布信息,即直方图中阈值与目标波峰的面积与横向差距,将其共同作为Otsu求取类间方差公式的权重,根据阈值与邻近目标波峰的灰度分布关系,使得越靠近目标的阈值,最终的类间方差相对越大,加大了分布概率比重,也避免了突出峰的影响。

具体改进方案为,首先对图像进行预处理,根据灰度分布直方图,筛选出直方图中目标和背景波峰处的灰度值,并分别定义为 l_m, l_n ;取阈值 t 遍历范围为 $l_m < t < l_n$,阈值至目标灰度值的距离为 X_m ,占背景与目标之间的总灰度差的比例为 $p_x = \frac{X_m}{l_m - l_n}$;阈值灰度值至

目标灰度值之间的像素点的总数为 $S = \sum_{i=l_m}^t h(i)$,占背景与目标之间的总像素点的比例为 $p_s = \frac{\sum_{i=l_m}^t h(i)}{\sum_{i=l_m}^{l_n} h(i)}$;将上述参数引入Otsu法的式(6)中作为权重系数,得到改进的类间方差算式为

$$\sigma_B^2 = [1 - v(t)][1 - P'(t)][p_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2 + p_2(t)(\mu_2(t) - \mu)^2] \quad (10)$$

式中, $P'(t) = P_x(t)P_s(t)$ 为加入的权重系数。从式(10)可以看出,在文献[12]基础上,加入与目标灰度值之间的信息,进一步对大范围波谷内的阈值进行选取,侧重靠近目标的阈值,减弱背景比例较大对最优阈值造成的影响,使得趋近于目标的类间方差相对增大。将阈值 t 在范围 $l_m < t < l_n$ 中进行遍历,分别运算式(10),选取得到最大类间方差的阈值点 t 作为最佳阈值。

3 实验验证

3.1 图像分割实验

为验证改进算法针对不同干扰情况下的分割效果,选取无干扰的标记点图像I、强光与脉冲噪声共同干扰的图像II、多光源光照干扰图像III以及阴影与脉冲噪声共同干扰的图像IV,利用改进算法对其进行阈值分割,实验平台CPU为Intel Core i3-4150 3.5 GHz,实现软件为Matlab R2015a,原图像及分割结果如图6所示。为比较改进算法的优越性,同时利用其他算法对图像进行分割,各算法分割阈值情况如图7所示。

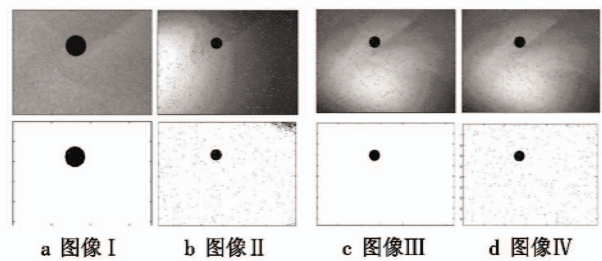
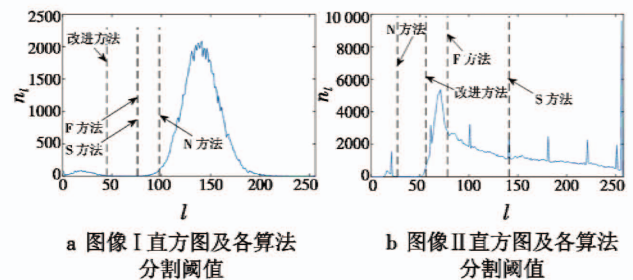


图6 改进算法对图像I, II, III和IV的分割结果
Fig.6 Threshold segmentation results of improved algorithm for image I, II, III and IV



a 图像I直方图及各算法分割阈值
b 图像II直方图及各算法分割阈值

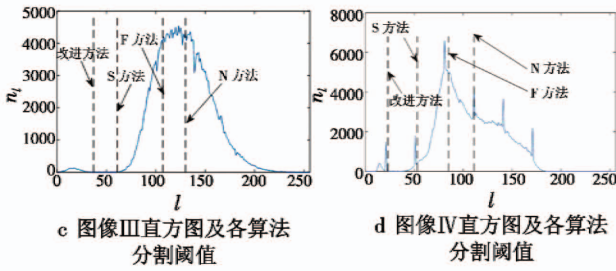


图 7 各算法对图像 I, II, III 和 IV 的分割阈值
Fig. 7 Threshold segmentation of each algorithm for image I, II, III and IV

由于改进算法适用于振动位移的测量, 需要求取标记点位置, 同时也为了使结果更直观, 对上述分割的二值图进行质心检测, 引入得到的坐标与测量的实际位置的偏差平方和作为位置偏差值以说明分割效果, 位置偏差值为 $E = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}$, 其中, (x_0, y_0) 为实际位置, (x, y) 为质心坐标, 单位为像素, 结果如表 1 所示, 表中, “/” 为分割失败情况。

表 1 各算法位置偏差值

Table 1 The position deviation of each algorithm

图像编号	偏差值/像素			
	N 方法	F 方法	S 方法	改进方法
I	1.055	0.714	0.301	0.282
II	0.631	/	/	0.912
III	27.50	31.41	0.310	0.364
IV	14.552	/	8.102	0.126

通过上述实验结果可以直观地看出改进的算法对选取的多干扰图像的分割均成功; 而表 1 从偏差值的角度表明, 除了在强光与脉冲干扰下逊色于 N 方法, 多光源与无干扰情况下与 S 方法持平之外, 其余情况下改进算法分割的标记点的位置均更准确; 综合来讲, 相较于其他改进算法, 本文算法能够较准确地分割出标记点。

3.2 振动位移测量实验

为进一步验证算法在实际振动测量中的效果, 在柔性悬臂梁末端进行标记, 施加模态频率为 4.3 Hz 的正弦激励, 并在振动过程中, 在中端、末端进行多光源照射, 且全程加入 10k 像素数量的脉冲噪声干扰, 利用 CCD 相机采集标记点振动图像, 相机帧速率设置为 90 帧/s, 最后利用不同算法进行阈值分割、质心检测以及坐标变换处理, 进而得到柔性悬臂梁的振动位移曲线, 如图 8 所示。

从图 8 可知, F 和 S 方法在无干扰下能够较好地检测出位移, 而在光照干扰下已经无法正常测量; N 方法在光照干扰下能够保持一定的有效性, 但并不能得到理想的正弦曲线; 相比之下, 本文改进算法在干扰下依然能够进行位移检测, 并且可以得到理想的正弦位移曲线, 有效准确地完成了振动位移的测量。

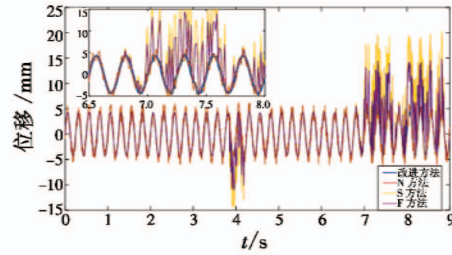


图 8 振动位移结果比较

Fig. 8 Comparison of vibration displacement

4 结论

本文在相关改进算法的基础上将阈值与目标波峰之间灰度值的差值和像素数量之和在总体中的比例共同作为权重, 对 Otsu 法进行了优化改进, 避免了占比较大的背景像素对阈值选取的影响, 解决了原算法无法对标记点图像进行分割的问题, 并能在多种干扰下依然保证有效分割。通过相关实验, 也多方位地证明了改进算法能够在多种干扰环境下, 对标记点的振动位移图像进行有效分割处理, 并得到准确的振动位移, 具有一定的抗干扰能力与优越性。

参考文献

- [1] TIAN B, LIU H, YANG N, et al. Design of a piezoelectric accelerometer with high sensitivity and low transverse effect[J]. Sensors, 2016. doi:10.3390/s16101587.
- [2] 曹丽曼. 压电式加速度传感器振动测量应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2015(7):164-166.
- [3] 陈若珠, 赵珊. 基于机器视觉技术的振动台试验变形位移测量方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(6):56-59.
- [4] 徐超, 张一凡, 韩晓明, 等. 基于机器视觉的大柔性结构振动位移测量[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4):781-786.
- [5] 吴一全, 孟天亮, 吴诗娅. 图像阈值分割方法研究进展 20 年(1994—2014)[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(1):1-23.
- [6] HARB E B, ISA N A M, SALAMAH S A. Improved image magnification algorithm based on Otsu thresholding[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 46:338-355.
- [7] XU H, WANG Y, WU Y, et al. Infrared and multi-type images fusion algorithm based on contrast pyramid transform[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 78:133-146.
- [8] 刘桂红, 赵亮, 孙劲光, 等. 一种改进粒子群优化算法的 Otsu 图像阈值分割方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(3):309-312.

测一定区域对应特征点几何稳定性的性质。在 CSS 角点检测的过程中,需要在较大尺度 σ_{high} 下计算轮廓曲线上每一点的曲率值,同时本文在特征点描述子生成时,选择的区域大小与 σ_{high} 相关,所以求取一个合适的 σ_{high} 无论是对于前期角点检测的鲁棒性,还是对于描述子的生成都是至关重要的,通过实验确定合适的 σ_{high} 取值,如图 5 所示。

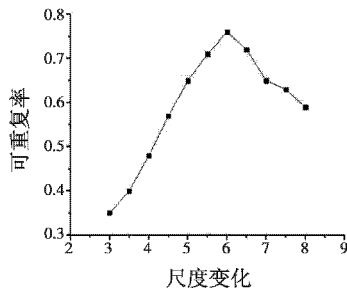


图5 可重复率与尺度变化曲线

Fig. 5 Repeatability vs scale changes

上述实验是根据文献[10]的论述,大致确定 σ_{high} 的范围,对不同的 σ_{high} 进行实验,通过实验发现大约在 $\sigma_{\text{high}} = 6$ 处的可重复率最高。为了使算法具有较好的尺度不变性,本文在描述子生成时,将特征点邻域与 σ_{high} 结合起来,对不同邻域大小进行实验,邻域过小则匹配准确率低,邻域过大则降低匹配速度,最后确定在 $\sigma_{\text{high}}/2$ 处的匹配效果最好。

5 结束语

基于 CSS 角点检测的快速匹配算法通过 CSS 检测角点,建立低维度的曲率描述子,保证了匹配的准确率,同时避免了曲率的二次计算,大大提高了匹配的速度,运用简单的“二进制距离”进一步缩短匹配时间。

实验表明该算法具有良好的匹配速度和精度,对

旋转变换的匹配效果较好,同时具有一定的尺度、光照不变性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 柯杉,王博亮,黄晓阳. 一种改进的 SIFT 算法及其在医学图像配准中的应用[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2010, 49(3):354-358.
- [3] 胡文超,周伟,关键. 基于改进 SIFT 的遥感图像匹配方法[J]. 电光与控制,2017, 24(5):36-39.
- [4] SUZUKI T. Vision based localization of a small UAV for generating a large mosaic images[C]//IEEE SICE Annual Conference, Taiwan, 2010:2960-2964.
- [5] 熊英,马惠敏. 3 维物体 SIFT 特征的提取与应用[J]. 中国图象图形学报,2010, 15(5):814-819.
- [6] 刘洋,韩广良,史春蕾. 基于 SIFT 算法的多表情人脸识别[J]. 液晶与显示,2016, 31(12):1156-1160.
- [7] 任立胜,王立中. 基于曲率尺度空间的角点检测图像匹配算法分析[J]. 电子技术应用,2016, 42(12):112-114, 118.
- [8] 高晶,吴育峰,吴昆,等. 基于角点检测的图像匹配算法[J]. 仪器仪表学报,2013, 34(8):1717-1725.
- [9] LOWE D G. Distinctive image features from scale invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [10] MOKHTARIAN F, SUOMELA R. Robust image corner detection through curvature scale space [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(12):1376-1381.
- [11] FAN J L, LEI B. A modified valley-emphasis method for automatic thresholding [J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(6):703-708.
- [12] 申铎京,张赫,陈海鹏,等. 快速递归多阈值分割算法[J]. 吉林大学学报:工学版,2016, 46(2):528-534.

(上接第 15 页)

- [9] 杨陶,田怀文,刘晓敏,等. 基于双界线的 Otsu 阈值分割法及其快速算法[J]. 计算机应用研究,2016, 33(12):3872-3875.
- [10] NG H F. Automatic thresholding for defect detection[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(14):1644-1649.