

# 基于 SURF 和改进 CSS 的弧形槽几何尺寸视觉检测算法研究

李阳,陆永华,张翔

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对汽车儿童安全座椅弧形槽内部结构复杂、几何尺寸不易测量的问题,提出一种基于 SURF 算法和 CSS 算法的弧形槽几何尺寸视觉检测算法。首先,双目相机倾斜拍摄弧形槽图像,检测弧形槽图像 SURF 特征并提取优质匹配集合实现图像配准,以渐入渐出法融合弧形槽图像。然后,采用基于改进 CSS 算法对弧形槽轮廓曲线进行角点检测,利用角点分割弧段进行弧形槽尺寸检测。实验结果表明,所提出的方法实现了弧形槽宽度和长度参数测量,宽度值测量误差 $<2\%$ ,长度值测量误差 $<1\%$ ,SURF 图像拼接算法平均处理时间 2.50 ms,改进 CSS 角点检测算法平均处理时间 0.30 ms,满足弧形槽检测的实时性和精度要求。

**关键词:**弧形槽;加速鲁棒性特征;曲率尺度空间;图像拼接;角点检测;视觉检测

**中图分类号:**TP391.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0145-05

## Geometric Size Measurement Algorithm for Arc-shaped Groove Based on SURF and Improved CSS

LI Yang, LU Yonghua, ZHANG Xiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Because the internal structure of the arc-shaped groove in the child safety seat is complicated and it is not easy to measure its geometric size, a geometric size vision measurement algorithm based on SURF and CSS is proposed. The binocular camera is used to collect the images of the arc-shaped groove. In order to achieve the image registration, high-quality matching sets are filtered from the original features of the images and detected by SURF algorithm. The integral arc-shaped groove image is fused with the fading in and out algorithm. Then, its contour curves are segmented with corners and detected by improved CSS algorithm, and then, the geometric size is measured. The research results indicate that the proposed method is used to measure its width and length. The measurement error of its width is less than 2%, and the measurement error of its length is less than 1%. The average processing time of using the SURF image stitching algorithm is about 2.50 ms and the average processing time of using the improved CSS corner detection algorithm is about 0.30 ms. It meets the requirement of the real-time accuracy of the arc-shaped groove measurement.

**Keywords:** arc-shaped groove; speeded-up robust features; curvature scale space; image stitching; corner detection; vision measurement

## 0 引言

视觉检测技术在工业领域中已经得到了广泛的应用,几何尺寸的视觉测量主要集中在测量精度要求高、尺寸微小的机械零件,如孔轴类、钣金件,而对于注塑件视觉检测的应用研究却相对较少。本文以安全座椅弧形槽为研究对象进行几何尺寸视觉检测算法研究。

由于安全座椅弧形槽尺寸及相机视野的限制,拟采用 2 个 CCD 相机倾斜拍摄,通过图像拼接、特征提取、图像分割等技术处理弧形槽图像,通过几何关系计算得出弧形槽参数。图像拼接主要分为图像匹配和图像融合 2 个步骤。基于特征的图像匹配算法主要有 SIFT (scale-Invari-

ant feature transform)<sup>[1]</sup>、SURF (speeded-up robust features)<sup>[2]</sup>、ORB (oriented FAST and rotated BRIEF)<sup>[3]</sup>。一些学者对特征匹配进行了研究,提出了特征匹配约束理论,包括 NNDR (nearest neighbor distance ratio)<sup>[4]</sup>、RANSAC (random sampling consensus)<sup>[5]</sup>、对极几何约束<sup>[6]</sup>、Hough 聚类<sup>[7]</sup>。图像融合方法影响拼接图像重叠区域的拼接质量。图像融合主要包括线性融合<sup>[8]</sup>、小波融合<sup>[9]</sup>、多分辨率融合<sup>[10]</sup>。弧形槽是由多个弧段组合而成,为了便于弧形槽参数提取,需要对弧形槽轮廓进行角点检测。基于轮廓的角点检测方法主要有 CSS (curvature scale space)<sup>[11-12]</sup>、ANDD (anisotropic directional derivative)<sup>[13]</sup>、CPDA (chord-to-point distance accumulation)<sup>[14]</sup>等。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51575277)

**作者简介:**李阳(1994—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助测控、数字图像处理。

本文提出了一种基于加速鲁棒性物征(SURF)和改进曲率尺度空间(CSS)的弧形槽几何尺寸检测算法。利用SURF算法检测弧形槽图像特征,优质匹配集计算单应性矩阵,以渐入渐出加权融合得到完整的弧形槽图像。基于改进CSS算法对自适应阈值和动态支持区域角度阈值的最佳参数进行选取,实现了弧形槽宽度和长度参数测量。

## 1 基于 SURF 的弧形槽图像拼接

由于 CCD 工业相机倾斜拍摄弧形槽,弧形槽图像会引入透视变形。为了消除透视畸变和镜头畸变,选取一个与测量平面平行的焦平面作为无畸变理想投影平面,将弧形槽图像从实际成像平面映射到图像分辨率为  $\delta$  的投影平面,如图 1 所示。

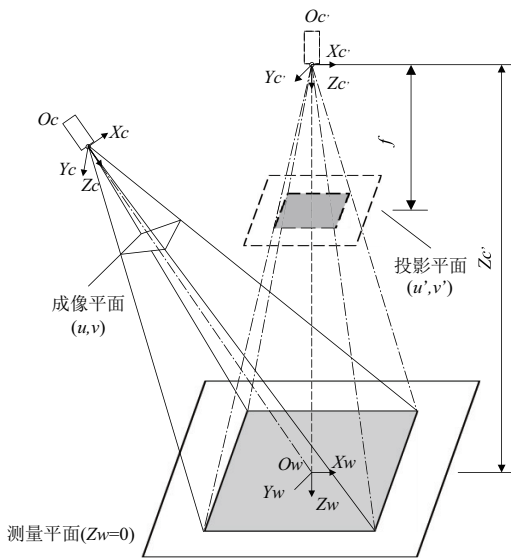


图 1 无畸变焦平面投影

如图 2 所示,基于 SURF 的弧形槽图像拼接算法如下:

- 1) 计算弧形槽图像 Hessian 矩阵,通过非极大值抑制找到 Hessian 行列式的局部极大值点,即 SURF 特征点。
- 2) 检测到 SURF 特征点后,将 SURF 特征点的相邻区域划分成 16 个子区域,对每个子区域所有响应求和,提取出 4 个描述子的值  $[\sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy|]$ 。
- 3) 计算 SURF 特征点描述子向量的欧氏距离,找到弧形槽图像之间的最近邻次邻点,实现 SURF 特征点初始匹配。
- 4) 通过 NNDR 检测、对称性检测、基于 RANSAC 的极线约束等策略,从 SURF 初始特征点筛选出优质匹配点。
- 5) 通过优质匹配点计算单应矩阵,实现弧形槽图像的图像匹配,利用渐入渐出法实现弧形槽图像融合。

不同尺度  $\sigma$  的 Hessian 矩阵阈值为该矩阵的行列式值。

$$Hessian = \begin{vmatrix} L_{xx}(X, \sigma) & L_{xy}(X, \sigma) \\ L_{xy}(X, \sigma) & L_{yy}(X, \sigma) \end{vmatrix} \quad (1)$$

最近邻比率是通过比较最近邻和次近邻距离的比率。2 个候选匹配点很接近,最近邻比率接近于 1,无法判断最佳匹配点。当比值小于设定阈值时,认为找到了最佳匹配

点。

$$NNDR = \frac{|D_A - D_B|}{|D_A - D_C|} = \frac{d_1}{d_2} \quad (2)$$

式中:  $D_A$  是一个视角中待匹配点描述子,  $D_B$  和  $D_C$  是另一视角中最近的 2 个匹配候选点描述子;  $d_1$  和  $d_2$  是描述子向量基于欧氏空间的最近邻距离和次近邻距离。

RANSAC 算法在 SURF 特征筛选主要是从样本集中随机选取 7 个匹配对估算基础矩阵,对剩下的匹配项进行测试,验证其是否满足根据基础矩阵得到的极线约束。当匹配对中有一个点到对极线的距离小于点到极线的最大距离  $dt$ ,就是视为局内点。置信概率  $p$  决定了 RANSAC 算法执行迭代的次数。

$$p = 1 - (1 - w)^k \quad (3)$$

式中:  $w$  为优质匹配项的概率,  $k$  为选取的次数。

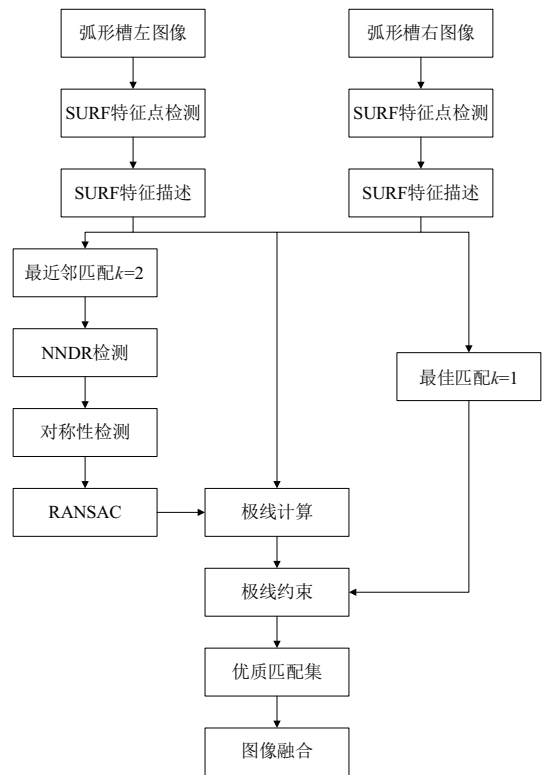


图 2 基于 RANSAC 极线约束的 SURF 拼接算法

如图 3 所示,通过优质特征匹配集计算弧形槽图像之间的单应矩阵实现图像匹配,利用单应变换计算弧形槽重叠区域和融合图像大小。为了减少融合运算,仅对重叠区域进行渐入渐出融合两幅弧形槽图像。

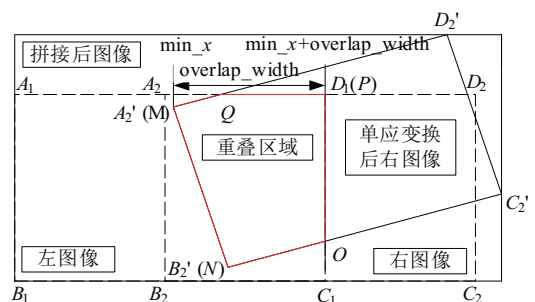


图 3 图像融合

## 2 基于改进 CSS 的弧形槽几何参数检测

### 2.1 改进 CSS 角点检测

为了消除弧形槽图像噪声对边缘提取结果的影响,需要对弧形槽图像进行高斯平滑操作。通过高斯核函数生成尺度为  $\sigma$  的  $k_{\text{ernal}} \times k_{\text{ernal}}$  的高斯平滑模板,二维高斯核函数定义如下:

$$k_{\text{ernal}} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

曲率计算公式如下:

$$\kappa(u, \sigma) = \frac{X_u(u, \sigma) Y_{uu}(u, \sigma) - X_{uu}(u, \sigma) Y_u(u, \sigma)}{(X_u^2(u, \sigma) + Y_u^2(u, \sigma))^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

改进 CSS 角点检测算法如下:

- 1) 对弧形槽灰度图像进行 Canny 边缘检测,获得二值边缘图;
- 2) 从 Canny 二值边缘图中提取弧形槽边缘轮廓,填补轮廓间隙,寻找轮廓上的 T 形角点;
- 3) 在一个固定的低尺度下计算弧形槽边缘轮廓曲率,选择所有曲率的局部极大值点作为候选角点;
- 4) 利用候选角点 ROS 区域的曲率修正平均值作为自适应阈值,去除候选角点中的圆角;
- 5) 通过迭代动态 ROS 计算角度,通过角度阈值去除虚假角点,最终收敛到合适的角点。

ROS 区域曲率自适应阈值计算公式如下:

$$T(u) = C \times \bar{\kappa} = 1.5 \times \frac{1}{L_1 + L_2 + 1} \sum_{i=u-L_2}^{u+L_1} \kappa(i) \quad (6)$$

式中:平均值  $\bar{\kappa}$  表示邻域的曲率; $u$  是曲线上的候选角点的位置; $L_1$  和  $L_2$  是 ROS 的两端; $C$  是修正系数。

一般情况下,如果  $160^\circ \leq \angle C_i \leq 200^\circ$ ,可以认为这是一个错误的角点。角度阈值计算公式如下:

$$\angle C_i = |\tan^{-1}(\Delta Y_1 / \Delta X_1) - \tan^{-1}(\Delta Y_2 / \Delta X_2)| \quad (7)$$

如图 4 所示,如果曲线上标记的 5 个点都是候选角点,那么 3 点的 ROS 应该是从 2 点~4 点之间的区域。根据角度计算可以判断 3 点是真正的角点。而当计算到 2 点时,其 ROS 区域为 1~3 之间,由于这之间的角度太大,将会视为非角点,4 点也是这样被排除。所以在下次迭代中,3 点的 ROS 是 1 点~5 点之间的区域,那同样会因为之间角度太大,而可以被排除在候选角点以外。通过这种迭代的动态 ROS 方法,一些孤立的候选角点会被移除,最终收敛到合适的角点位置。

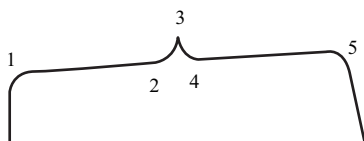


图 4 动态 ROS

### 2.2 弧形槽几何参数计算

弧形槽上下弧边可近似看作同心,如图 5 所示,对上弧

段等间距采样,对相邻的 3 个采样点  $A, B, C$ ,根据数学几何关系易求得圆心  $O$ 。根据点  $P$  到直线  $OB$  的距离计算公式  $d = \frac{OB \times BP}{|OB|}$  可知,遍历下弧段所有轮廓点求得  $d_{\text{min}}$ ,即点  $Q$  为所求点, $BQ$  就是弧形槽采样点  $B$  处的宽度像素值。

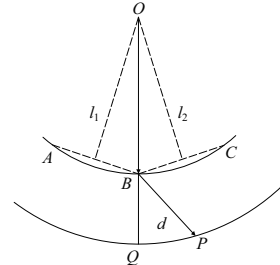


图 5 弧形槽几何关系计算

## 3 算法测试及实验误差分析

安全座椅弧形槽检测系统如图 6 所示。CCD 相机型号为:大恒 MER-132-30GC,图像分辨率为  $1292 \times 964$ 。实验采用的运行环境为 Intel (R) Core (TM) i5-6440HQ CPU @ 2.60 GHz,8 GB 内存的 PC 机,图像处理开发环境选用 VS2013+OpenCV 2.4.8。

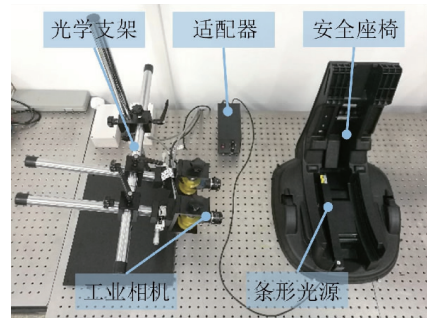


图 6 安全座椅视觉检测平台

摄像机采用 OpenCV 张正友标定法,得到:

$$\text{左相机内参矩阵 } M_1' = \begin{bmatrix} 3211.341 & 0 & 626.226 \\ 0 & 3215.950 & 579.095 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{外参矩阵 } M_2' = \begin{bmatrix} 0.614 & 0.789 & 0.020 & -2.044 \\ -0.782 & 0.605 & 0.151 & 2.068 \\ 0.107 & -0.109 & 0.989 & 0.350 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{畸变矩阵 } K' = [0.113 \quad -0.255 \quad 0.007 \quad -0.019 \quad 1.783];$$

$$\text{右相机内参矩阵 } M_1' = \begin{bmatrix} 3211.341 & 0 & 626.226 \\ 0 & 3215.950 & 579.095 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{外参矩阵 } M_2' = \begin{bmatrix} 0.064 & -0.996 & 0.061 & -2.082 \\ 0.988 & 0.071 & 0.134 & 2.079 \\ -0.138 & 0.052 & 0.989 & 0.326 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{畸变矩阵 } K' = [-0.717 \quad 14.752 \quad 0.002 \quad -0.022 \quad -15.846],$$

$$\text{左右相机间的平移矩阵 } T = [-115.774 \quad 10.923 \quad 7.154 \quad 5],$$

$$\text{旋转矩阵 } R = \begin{bmatrix} 0.999 & -0.019 & 0.014 \\ 0.020 & 0.999 & 0.003 \\ -0.014 & -0.003 & 0.999 \end{bmatrix},$$

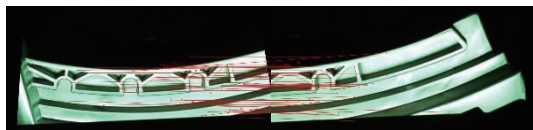
左右相机焦距  $f = 11.99 \text{ mm}$ , 投影平面分辨率  $\delta = 0.169 \text{ mm/pixel}$ 。

### 3.1 图像拼接及角点检测算法测试

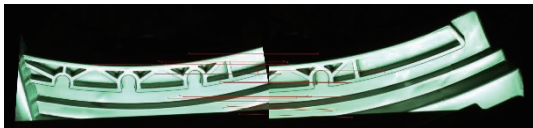
弧形槽拼接参数:  $Hessian = 400$ ,  $NNDR = 0.6$ , 到极点最小距离  $dt = 1$ , 可信度  $p = 0.95$ 。分别统计未使用极线约束和使用极线约束拼接算法的优质匹配数目、错误匹配数目、正确匹配率、拼接时间, 见表 1 和图 7。

表 1 图像拼接实验结果比较

图像拼接算法	评价指标	弧形槽
	初始匹配数目	626
未使用极线约束的 SURF 匹配+ 渐入渐出融合	优质匹配数目/误匹配数目	51/12
	正确匹配率/(%)	75
	拼接时间/ms	2.52
	初始匹配数目	626
使用极线约束的 SURF 匹配+ 渐入渐出融合	优质匹配数目/误匹配数目	19/1
	正确匹配率/(%)	94.73
	拼接时间/ms	2.50



a) 未使用极线约束的SURF匹配



b) 使用极线约束的SURF匹配



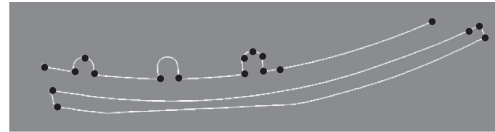
c) 渐入渐出加权融合效果图

图 7 弧形槽图像 SURF 拼接

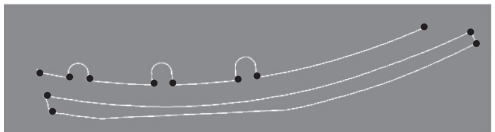
由上述实验对比可知, 距离约束虽然能剔除一部分 SURF 初始匹配集合误匹配点, 但依然存在许多错误的匹配, 而使用 RANSAC 极线约束的 SURF 匹配只有少数落在极线上的错误匹配, 匹配正确率明显提高。对于弧形槽 SURF 特征的正确匹配率能达到 94.73%, 拼接时间为 2.5 ms, 控制在毫秒级以内, 满足在线检测的实时性要求。

对于弧形槽边缘曲线, 分别采用原始 CSS 算法和改进 CSS 算法进行角点检测, 检测结果如图 8 所示。原始 CSS 检测角点比改进 CSS 多出了 2 个虚假角点和 4 个圆角, 而改进 CSS 全部正确的检测出所有角点, 角点定位误

差在 3 个像素以内, 角点检测时间约为 2.0 ms, 满足弧形槽 0.5 mm 的测量精度和在线检测要求。针对弧形槽的角点检测, 改进 CSS 算法最佳参数为: 曲率空间尺度  $\sigma = 5$ , 自适应阈值系数  $C = 1.5$ , 动态 ROS 角度阈值  $\angle C = 160^\circ$ 。



a) 原始CSS



b) 改进CSS

图 8 弧形槽角点检测结果

### 3.2 弧形槽测量误差分析

通过对弧形槽上弧段 1~4 等间隔采样 21 点, 利用几何计算弧形槽宽度, 并在弧形槽图像中标记宽度方向, 如图 9 所示。

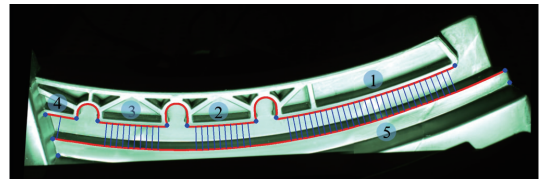


图 9 弧形槽尺寸检测结果

高斯滤波会导致弧形槽图像边缘沿梯度方向发生偏移, 本文分别对常用的  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$  的高斯模板进行弧形槽图像平滑, 利用角点检测和几何关系计算弧形槽长度和宽度在不同大小高斯核的测量值, 如表 2、表 3 和图 10 所示。

表 2 弧形槽各弧段长度

数值	弧段编号					
	1	2	3	4	5	
实际值/mm	111.2	43.2	43.8	19.5	279.3	
测量值/ mm	$k_{\text{ernal}} = 3$	110.51	42.88	43.05	19.49	278.98
	$k_{\text{ernal}} = 5$	110.51	42.88	42.98	19.32	278.98
	$k_{\text{ernal}} = 7$	110.17	42.37	42.98	19.15	278.81
测量误 差/(%)	$k_{\text{ernal}} = 3$	0.62	0.74	0.17	0.51	0.11
	$k_{\text{ernal}} = 5$	0.62	0.74	1.87	0.92	0.11
	$k_{\text{ernal}} = 7$	0.93	1.92	1.87	1.79	0.17

表 3 不同大小高斯模板对弧形槽宽度的影响

高斯模板 大小 $k_{\text{ernal}}$	弧形槽 宽度/mm	采样点平均 宽度/mm	测量误差/(%)
3		14.27	1.93
5	14.00	14.41	2.93
7		14.56	4.00



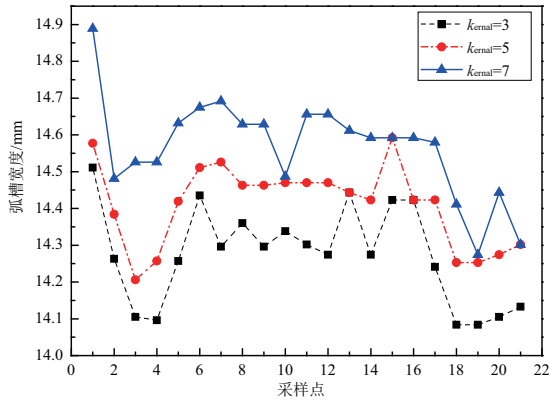


图10 弧形槽采样点宽度

分析表2和表3可知,高斯滤波对弧形槽边缘影响主要在法向(宽度方向)。不同高斯核对切向(长度方向)影响变化不大,切向测量误差均 $<2\%$ 。随着高斯核大小选取得越大,法向测量误差随之增大。对于弧形槽0.5 mm检测精度,应尽可能选择 $3 \times 3$ 大小的高斯核。

## 4 结语

本文提出了一种基于SURF和改进CSS的弧形槽几何尺寸检测算法,利用SURF图像拼接解决了单个相机拍摄弧形槽的视野限制,通过改进CSS角点检测算法从弧形槽轮廓中提取特征弧段,满足弧形槽0.5 mm的检测精度和在线实时检测。下一步通过对提取特征轮廓进行曲线拟合,最终得到弧形槽轮廓的三维重建图像,对安全座椅的装配具有一定的指导作用。

### 参考文献:

- [1] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [2] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- [3] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF [C]//Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on IEEE, 2011: 2564-2571.

- [4] PARK H, MITSUMINE H, FUJII M. Automatic adjustment of the distance ratio threshold in nearest neighbor distance ratio matching for robust camera tracking[J]. IEEE Transactions on Information and Systems, 2011, 94(4): 938-940.
- [5] WU Y, MA W, GONG M, et al. A novel point-matching algorithm based on fast sample consensus for image registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 43-4.
- [6] 杨敏,沈春林.基于对极几何约束的景象匹配研究[J].南京航空航天大学学报,2004,36(2):235-239.
- [7] WANG Z, WANG H. Target location of loitering munitions based on image matching[C]//Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2011:606-609.
- [8] 张亚娟.基于SURF特征的图像与视频拼接技术的研究[D].西安:西安电子科技大学,2013.
- [9] 古洪杰.基于图像融合的小模数塑料齿轮齿形缺陷检测技术研究[D].长春:吉林大学,2009.
- [10] BROWN M, LOWE D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features [J]. International Journal of Computer Vision, 2007,74(1):59-73.
- [11] 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.
- [12] MOKHTARIAN F. Enhancing the curvature scale space corner detector [C]//Proc. Scandinavian Conf. on Image Analysis, Bergen, Norway 2001, 2001: 145-152.
- [13] SHUI P L, ZHANG W C. Corner detection and classification using anisotropic directional derivative representations [J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2013, 22(8):3204-3218.
- [14] AWRANGJEB M, LU G. Robust image corner detection based on the chord-to-point distance accumulation technique [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2008, 10(6): 1059-1072.
- [15] 陈洁,高志强,密保秀,等.引入极线约束的SURF特征匹配算法[J].中国图象图形学报,2016,21(8):1048-1056.
- [16] HE X C, YUNG N H C. Curvature scale space corner detector with adaptive threshold and dynamic region of support [C]. Pattern Recognition, ICPR 2004 Proceedings of the 17th International Conference on IEEE, 2004, 2: 791-794.

收稿日期:2018-08-13

### (上接第110页)

- [9] W. Wei, C. Ming, Z. Bangfu, et al. A fault-tolerant permanent-magnet traction module for subway applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014,29:1646-1658.
- [10] B Tian, Q An, JD Duan, et al. Cancellation of torque ripples with foc strategy under two phase failures of five-phase pm motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016,99:1.
- [11] N.Bianchi,S.Bolognani,Pre, et al. Strategies for the fault-tolerant current control of a five-phase permanent-magnet motor[J]. Industry Applications on IEEE Transactions, 2007,43:960-970.
- [12] A.Mohammadpour,S.Sadeghi, L.Parsa. A generalized fault-tolerant control strategy for five-phase pm motor drives considering

- star, pentagon, and pentacle connections of stator windings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 63-75.
- [13] 高宏伟,杨贵杰,刘剑.五相永磁同步电机容错控制策略[J].电机与控制学报,2014,18(6):61-65.
- [14] 康敏,孔武斌,黄进.电动汽车用五相感应电机容错控制[J].电机与控制学报,2014,18(3):1-6.
- [15] R. RERABELLI, P. MUTSCHLER. Fault tolerant voltage source inverter for permanent magnet drives [J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2011,29(2):500-508.

收稿日期:2018-06-28