

数来判断角点。2006年 Rosten 和 Drummond^[13]提出了高速角点检测算子,其基本思想是利用机器学习来加速角点检测过程。上述两种算法也都对图像尺度变化敏感。近年来,针对当前 FAST 角点检测算法只能检测单一类型的角点,并且单一阈值作用于整幅图像很难取得理想的效果等问题, Park 等人^[14]为了解决可穿戴设备的图像分辨率与系统功耗之间存在权衡这一问题,提出了一种新的快速角点检测方法,它在计算性能和可重复性方面优于以前的算法。

1.2 基于轮廓曲线的角点检测

相对于基于梯度和基于模板的检测器,基于轮廓的检测器在角点检测前先进行边缘轮廓检测^[15],在轮廓上而不是整幅图像上检测角点,因此有着极低的错误检概率。该方法的角点测度被定义在轮廓上并且区分于轮廓上的光滑像素点。

1.2.1 基于 Freeman 链码的角点检测技术

二维线条图像可以用方向 Freeman 链码表示,这种检测方法先分割图像,然后提取图像边界的 Freeman 链码,将方向改变速率大的点标记为角点。Freeman 链码是指相邻两像素连线的八种可能方向值,称为八方位链码。该方法计算步骤简洁,但是检测效果强依赖于图像分割的质量。并且由于需要计算夹角,对于噪声敏感,在进行检测时必须对图像进行去噪预处理。

2014年,曾接贤等人^[16]提出了一种曲率尺度空间与链码方向统计相结合的角点检测方法。2017年, Rachmawati 等人^[17]提出了一种将高速角点检测与 Freeman 链码相结合的多边形逼近技术。该方法利用一组图像角点构造了一串有序线段的近似多边形,该近似多边形可以进一步用于形状表示和分析领域,作为数字图像的轮廓描述。2018年,刘相湖等人^[18]提出了一种对 Freeman 链码分析的角点检测算法,该方法对 Freeman 链码发生变化时,通过分析其连续前后多个点的链码是否符合一定的规则来判定角点。

1.2.2 基于 CSS 的角点检测算法

Mokhtarian 等人^[19]提出了曲率尺度空间 (Curvature-Scale-Space, CSS) 的角点检测器,不同角度下的局部曲率被用于角点检测,角度下追踪角点并改善定位准确性。CSS 角点检测算法对轮廓的局部变化和噪声高度敏感而且很难选择合适的高斯尺度平滑轮廓和角点阈值。Zhong 等人^[20]提出了直接曲率尺度空间 (DCSS),方法是将平面曲线的曲率与高斯核直接转换而产生的

CSS。他们从理论上分析了 DCSS 在平面曲线拐角检测中的应用。研究了孤立的单角和双角模型的尺度空间行为,定义了若干模型属性,使 DCSS 图像能够转化为树型组织,从而能够在多尺度意义上进行角点检测。2016年,李伟生等人^[21]提出了一种基于曲率多尺度的自适应角点检测算法 AMCP (Adaptive Multi-scale Curvature Polynomial),该算法结合了尺度多项式的方法,并构造局部曲率显著度 LCCS (Local Corners Curvature Saliency),从而用自适应的阈值代替全局阈值,极大地增强了算法应对尺度、旋转等变化的鲁棒性。

1.2.3 利用弦到点的距离累加的角点检测算法

2008年, Awrangjeb 等人^[22]提出了利用弦到点的距离累加 (CPDA) 的角点检测算法,该方法在对图像中的角点进行定位的同时产生最小的定位误差,该算法有效的避免了 CSS 算法中存在的主要问题,却存在着以下问题:一是邻近角点被合并,二是钝形角点被误删除,三是无法有效剔除圆形角点。2014年, Jin 等人^[23]针对基于弦对点距离积累、定位精度低、检测时间复杂度高等缺点,采用先得到单尺度下的候选角点,保持相邻角点,然后计算了多尺度下候选角的特征值,有效地消除了伪角。2017年, Hossain 等人^[24]提出了一种基于 CPDA 改进的角点检测算法 CADT。该方法的预处理和改进步骤与 CPDA 相似,但是有效的减少了定位误差和提高了平均重复性,降低了角点的伪检率。

1.2.4 基于角度 (Angle) 的角点检测算法

基于 Angle 的角点检测算法出根据边缘点与左右邻域内的其他点形成的夹角最小值来标志该边缘点,把 Angle 值固定在一定的范围之内,其值大小与角点的尖锐度成正比,可以有效避免了基于 CSS, CPDA 的算法中存在的问题。但是还存在以下不足:不能检测出邻近角点,无法有效去除圆形角点、虚假角。2012年, Sadat 等人^[25]结合了角探测器 CPDA 和高曲率点探测器 IPAN99,为不同的图像变换提供了鲁棒的角点位置。2017年,金亦挺等人^[26]提出基于角度累加的角点检测算法,在获取图像边缘后定义反映边缘点特征的角度累加概念,并在“单弦”下计算边缘点角度累加值,以此作为角点初始响应,获取到候选角点;然后构造候选角点的局部自适应阈值来去除圆形角点,并通过实验来确定其支撑邻域范围和比例系数;再在“三弦”下获取角点特征值,构造全局阈值来去除伪角点;最后对曲线端点和 T 交叉点进行检测,得到最终角点检测结果。

1.2.5 多尺度 Gabor 滤波器的角点检测

2004年, Gao 等人^[27]提出的基于 Gabor 小波的角点检测算子. 多尺度 Gabor 滤波器的角点检测算法克服了在不同图像上的尺度选择问题. 该算法首先对图像进行边缘轮廓的提取, 进而用一组构建好的 4 个尺度 8 个方向 Gabor 滤波器的虚部对图像进行平滑处理, 并计算每个像素在其相同尺度下各个方向上 Gabor 滤波器虚部响应的归一化的和. 最后将每个边缘像素点在所有尺度下的乘积作为新的角点测度, 当角点测度大于预设阈值时, 则认定该点为角点. 2014年, Zhang 等人^[28]研究提出了一种基于轮廓的角点检测器, 该检测方法利用 Gabor 滤波器虚部在轮廓上的幅值响应. 与传统的通过分析边缘轮廓形状和搜索平面曲线上的局部曲率极大值来检测角点的方法不同, 该角点检测器结合了边缘轮廓的像素及其相应的灰度变化信息. 2016年, 田子怡等人^[29]也提出了提出了一种基于边缘轮廓线的多尺度 Gabor 滤波器的角点检测算法. 2017年, 高华^[30]提出了一个既利用到图像边缘轮廓信息又利用到图像灰度信息的基于 Log-Gabor 梯度方向一致性的角点检测算法, 以提高角点检测器的检测性能.

1.3 其他的角点检测技术

此外许多研究人员也各自提出或改进了基于角点的检测算子. 2008年, He 和 Yung^[31]提出了一种使用自适应曲率阈值从初始列表中删除圆角的角点检测方法. 刘文进等人^[32]提出一种基于 AP 聚类角点提取优化的双边滤波 (BF) 角点检测改进算法. 2015年, 孔祥楠等人^[33]

提出了一种基于各向异性高斯方向导数表示的角点检测器和分类器. 该角点检测器融合了基于轮廓和灰度强度的检测思想, 提出了一种像素处表示是定向角度的函数, 从而表征了像素周围的局部方向灰度变化. 2016年, Xing 等人^[34]基于局部区域的自适应阈值, 提出了一种新的带填充环和外环的掩码来检测图像中的角点. 该方法先利用内填充圆作为响应函数, 对图像角领域、目标边缘以及平坦区域等非角区域进行滤波. 然后利用复杂的响应函数, 同时考虑内圈和外环的边缘, 并采取相关算法检测位于薄带、噪声和突出像素上的虚假角点. 2017年, Cho 等人^[35]提出了一种新的基于非角度测量的角点检测方法. 该非角函数消除了位于平坦区域的像素并删除了沿任意方向沿边缘的像素.

各种角点技术综合性能总结以及优缺点在表 1 有详细的展示.

2 角点检测算法的测评技术

由于角点没有精准的定义, 因此角点的确认是一个非常主观的二值化过程. 一般由算法测评者根据实际应用需求自行给出, 由此影响了测评结果的客观性. 现有的测评技术主要依赖于理论分析, 基于标定的参考角点, 以及基于一致性判定, 常用的主要为后两者. 其中比较经典的基于标定的参考角点方法由 2003 年 Rockett^[36]提出. 该方法通过一组具有参考角点的图像集, 然后对图形进行不同算法的角点检测, 利用 ROC 曲线对检测器的性能进行评价.

表 1 各种角点技术综合性能总结

角点技术	视频	快速性	鲁棒性	准确性	优点	不足之处
基于灰度图像的角点检测	Moravec 角点检测	一般	弱	一般	旋转不变性	对噪声和边缘敏感
	基于 Harris 角点检测	较快	较好	高	光照鲁棒, 旋转不变	对噪声图像不准确
	SUSAN 的角点检测	快	较好	较好	高重复性, 旋转不变	噪声敏感, 信息量少
	FAST 角点检测技术	快	较好	高	较为快速	尺度变化敏感, 单一
基于轮廓曲线的角点检测	基于 Freeman 链码	一般	强	高	光照鲁棒, 高重复性	依赖图像分割的质量
	基于 CSS 的角点检测	快	强	较好	高重复性	局部变化敏感
	CPDA 的角点检测	一般	强	高	有效地消除了伪角	不能检测出邻近角点
	基于角度 (angle)	一般	较好	高	去除圆形角点、虚假角	不够快
其他的角点检测技术	多尺度 Gabor 滤波器	快	较好	高	克服多尺度问题	鲁棒性有待提高
	基于 He & Yung	一般	较好	高	有效地消除了伪角	计算复杂度高

本文主要针对基于一致性^[37]的判定的角点检测评价技术进行详细介绍. 主要有两个指标: 一是角点重复率, 二是角点定位误差. 该方法先是对给定图片进行角点的提取, 角点数记为 N_c . 然后对图形进行如下操作:

旋转变换, 尺度变化, 仿射变换, Jpeg 压缩等. 提取变化后的角点数量 N_m , 最后对两者进行匹配得到配对数 N_r . 其中, 角点重复率函数如下:

$$R = (1/2) \times N_r \times (1/N_c + 1/N_m) \quad (5)$$

角点定位误差函数如下:

$$E = \sqrt{(1/N_r) \times \sum_{i=1}^{N_r} [(x_o^i - x_t^i)^2 + (y_o^i - y_t^i)^2]} \quad (6)$$

其中, (x_o^i, y_o^i) 和 (x_t^i, y_t^i) 为图片变换前后的角点坐标。

为了避免数据展示的冗杂, 本文选取了一定数量的图片, 以及几种角点检测算法, 对其性能进行了评测, 大致展示了这几种算法的角点重复率及角点定位误差。实验数据部分采用了 CPDA, He & Yung, CSS, FastCPDA 等较为新颖的角点检测算法进行了测试。其中 CPDA 利用弦到点的距离累加; He & Yung 使用自适应曲率阈值从初始列表中删除圆角; CSS 利用了曲率尺度空间; FastCPDA 是一种改进算法。具体结果如图 1 和图 2 所示。具体细节鉴于篇幅不再赘述。所展示的图片检测效果则是采取了几种常见的角点检测算子以供参考, 如图 3 和图 4 所示。

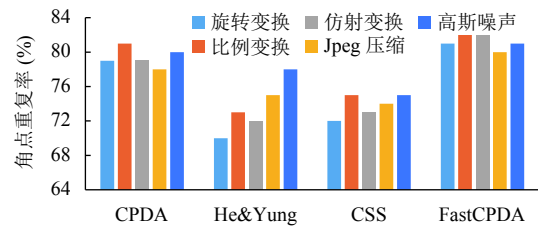


图1 角点重复率示意图

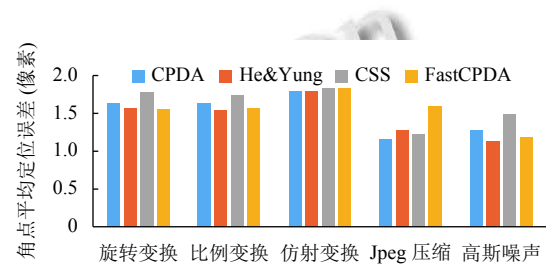


图2 角点定位误差示意图

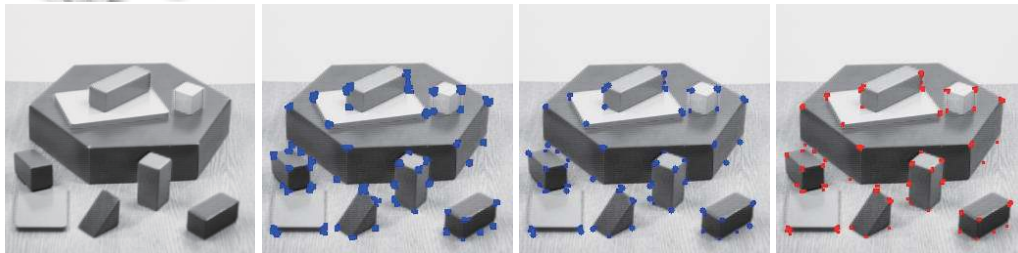


图3 角点较少图像的检测示例

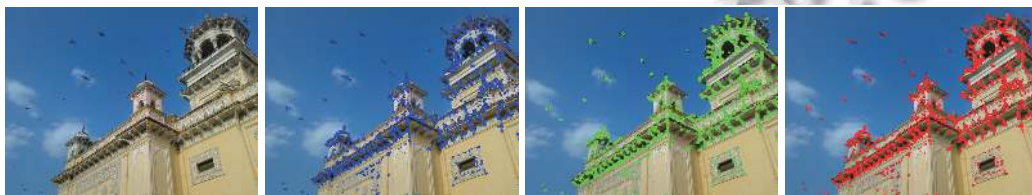


图4 角点较多图像的检测示例

3 角点检测算法的实际应用

洪磊等人^[38]针对 Hessian 算子在棋盘格角点检测过程中边缘局部区域角点检测失败的问题, 提出一种恢复角点识别的修正算法。Lin 等人^[39]提出了两种新的三维网格数据角点检测算法, 分别研究了在多尺度空间中曲面的几何性质以及利用简单三角形原理检测网格角点的方法。谢志峰等人^[40]在深度神经网络的烟码智能识别方法中采用角点检测进行图像块的切割。Li 等人^[41]针对高光谱图像提出了极限约束空间谱角

(ECSSC) 的定义并设计了一种基于 ECSSC 和并行计算的图像级 HSI 分类框架。该算法能够从 HIS 角点特征中检测出丰富的角点特征, 具有较高的重现性, 基于 ECSSC 的图像级 HSI 检测精度明显高于现有的算法。Wang 等人^[42]针对传统角点检测在视频图像复杂场景中角点检测精度低、实时性差的问题, 提出了一种基于 ORB 特征提取和群 SAC 算法的快速角点检测算法。该算法应用于光照变化、尺度变化、旋转变换、遮挡图像等复杂场景的视频图像中具有较高的精度和较低

时间复杂度,具有较强的鲁棒性.刘妍等人^[43]提出了一种基于SAR快速角点检测的SAR图像配准方法,该方法是一种自定义的基于加速段测试(FAST)特征的SAR图像配准方法.该方法表明了快速合成孔径雷达能够检测出足够数量的角点,具有较高的重复性和稳定性,在应用于图像配准时也能得到较好的配准结果.

4 结论与展望

本文对现有的角点检测技术进行了分类和归纳,详细阐述典型角点检测算法的关键步骤,表1对基本的角点检测算法进行了归纳和总结.本文也对近几年来各类角点检测算法发展与改进提出了一点建议.

总的来说,角点检测算法的研究改进工作主要有以下几个方面:(1)根据实际工程的需求出发,角点检测技术的一些指标如快速性、准确性、鲁棒性等有着不同的定量指标,所以选取的角点检测算法需要从业人员进行全局的分析.(2)从算法角度来看,直接基于灰度图像强度的角点检测基本上是全球搜索,可以进行局部搜索优化算法;基于边缘轮廓的角点检测一般采用了多分辨分析并行处理,从灰度图像得到边缘轮廓曲线要经过两次以上的全局搜索,计算复杂度高,对此进行算法复杂度的优化,可以提高检测的检测度.(3)角点检测测评技术的研究亟待完善,现在还没有公认的大规模关于角点检测的数据集,而且角点测评技术的维度也十分有限.后续研究者可以在这两方面着力研究.

除此之外,本文还搜集了一些最新的角点检测算法在工程中的实际应用案例.角点检测在三维场景重建、运动估计、视觉跟踪、机器人定位、视觉跟踪、图像全景拼接以及图像配准与匹配等领域有着广泛的应用前景.角点检测技术仍在发展,本文罗列的一些较新的方法及经典方法的改进策略,意在期望更多研究人员推动这一课题更快发展.文章中必然存在的一些不当的问题,我们欢迎对这些观点进行批判和纠正.

参考文献

- Lebeda K, Hadfield S, Matas J, *et al.* Texture-independent long-term tracking using virtual corners. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(1): 359–371. [doi: 10.1109/TIP.2015.2497141]
- 刘阳成,朱枫.一种新的棋盘格图像角点检测算法. *中国图象图形学报*, 2006, 11(5): 656–660. [doi: 10.3969/j.issn.1006-8961.2006.05.008]
- 章为川,孔祥楠,宋文.图像的角点检测研究综述. *电子学报*, 2015, 43(11): 2315–2321. [doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.026]
- Morevec HP. Towards automatic visual obstacle avoidance. *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2*. Cambridge, UK. 1977. 584.
- Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector. *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*. Alvey, UK. 1988. 147–151.
- Qiao YJ, Tang YC, Li JS. Improved Harris sub-pixel corner detection algorithm for chessboard image. *Proceedings of the 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control*. Harbin, China. 2013: 1408–1411.
- 卢伟家,刘缠牢.一种基于Harris特征点检测的改进算法. *仪表技术与传感器*, 2017, (12): 98–100, 104. [doi: 10.3969/j.issn.1002-1841.2017.12.024]
- Wang ZC, Li R, Shao ZH, *et al.* Adaptive Harris corner detection algorithm based on iterative threshold. *Modern Physics Letters B*, 2017, 31(15): 1750181. [doi: 10.1142/S0217984917501810]
- Smith SM, Brady JM. SUSAN—a new approach to low level image processing. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45–78. [doi: 10.1023/A:1007963824710]
- He LY, Zhou XY. An auto-adaptive threshold pre-detection SUSAN corner detection Algorithm. *Proceedings of the 2013 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. Hangzhou, China. 2013. 511–514.
- 王冠群,马苗,张艳宁,等.基于高斯变换的多尺度SUSAN角点检测方法. *计算机工程与应用*, 2016, 52(12): 184–188. [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1407-0527]
- Trajkovic M, Hedley M. Fast corner detection. *Image and Vision Computing*, 1988, 16(2): 75–87.
- Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection. *Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision*. Graz, Austria. 2006. 430–443.
- Park S, Kim G, Park J, *et al.* A 1.5nJ/pixel super-resolution enhanced FAST corner detection processor for high accuracy AR. *Proceedings of the ESSCIRC 2014—40th European Solid State Circuits Conference*. Venice Lido, Italy. 2014. 191–194.
- 赵亚利,章为川,李云红.图像边缘轮廓自适应阈值的角点检测算法. *中国图象图形学报*, 2016, 21(11): 1502–1514. [doi: 10.11834/jig.20161110]
- 曾接贤,李炜焯.曲率尺度空间与链码方向统计的角点检测. *中国图象图形学报*, 2014, 19(2): 234–242.

- 17 Rachmawati E, Supriana I, Khodra ML, *et al.* FAST corner detection in polygonal approximation of shape. Proceedings of the 2017 3rd International Conference on Science in Information Technology. Bandung, Indonesia. 2017. 166–170.
- 18 刘相湖, 王涛, 张小哲. 对 Freeman 链码分析的角点检测算法. 计算机系统应用, 2018, 27(4): 202–208. [doi: [10.15888/j.cnki.csa.006314](https://doi.org/10.15888/j.cnki.csa.006314)]
- 19 Mokhtarian F, Suomela R. Robust image corner detection through curvature scale space. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(12): 1376–1381. [doi: [10.1109/34.735812](https://doi.org/10.1109/34.735812)]
- 20 Zhong BJ, Liao WH. Direct curvature scale space: Theory and corner detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(3): 508–512. [doi: [10.1109/TPAMI.2007.50](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.50)]
- 21 李伟生, 李泽亚. 一种改进的多尺度自适应角点检测方法. 计算机应用与软件, 2016, 33(1): 185–189. [doi: [10.3969/j.issn.1000-386x.2016.01.047](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-386x.2016.01.047)]
- 22 Awrangjeb M, Lu GJ. Robust image corner detection based on the chord-to-point distance accumulation technique. IEEE Transactions on Multimedia, 2008, 10(6): 1059–1072. [doi: [10.1109/TMM.2008.2001384](https://doi.org/10.1109/TMM.2008.2001384)]
- 23 Jin YT, Wang WL, Zhao YW, *et al.* Fast corner detector based on chord-to-point distance accumulation. Computer Science, 2014, 41(4): 306–308, 313.
- 24 Hossain MA, Tushar AK. Chord Angle Deviation using Tangent (CADT), an efficient and robust contour-based corner detector. Proceedings of IEEE International Conference on Imaging, Vision & Pattern Recognition. Dhaka, Bangladesh. 2017. 1–6.
- 25 Sadat RMN, Sayeeda Z, Salehin MM, *et al.* A corner detection method using angle accumulation. Proceedings of the 14th International Conference on Computer and Information Technology. Dhaka, Bangladesh. 2011. 95–99.
- 26 金亦挺, 王万良, 赵燕伟, 等. 基于角度累加的鲁棒角点检测算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(11): 2005–2014. [doi: [10.3969/j.issn.1003-9775.2017.11.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9775.2017.11.006)]
- 27 Gao X, Sattar F, Venkateswarlu R. Corner detection of gray level images using gabor wavelets. Proceedings of 2004 International Conference on Image Processing. Singapore, Singapore. 2004. 2669–2672.
- 28 Zhang WC, Wang FP, Zhu L, *et al.* Corner detection using Gabor filters. IET Image Processing, 2014, 8(11): 639–646. [doi: [10.1049/iet-ipr.2013.0641](https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2013.0641)]
- 29 田子怡, 李云红. 基于多尺度 Gabor 滤波器的角点检测. 国外电子测量技术, 2016, 35(7): 75–79, 84. [doi: [10.3969/j.issn.1002-8978.2016.07.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-8978.2016.07.019)]
- 30 高华. Log-Gabor 梯度方向下的角点检测. 中国图象图形学报, 2017, 22(6): 797–806.
- 31 He AX, Yung NHC. Corner detector based on global and local curvature properties. Optical Engineering, 2008, 47(5): 057008. [doi: [10.1117/1.2931681](https://doi.org/10.1117/1.2931681)]
- 32 刘文进, 张蕾, 孙劲光. 近邻传播聚类优化的角点检测改进算法. 计算机工程与应用, 2016, 52(9): 219–222. [doi: [10.3778/j.issn.1002-8331.1405-0303](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1405-0303)]
- 33 孔祥楠, 卫建华, 赵强, 等. 基于各向异性高斯核的角点检测. 电子测量技术, 2015, 38(8): 69–72. [doi: [10.3969/j.issn.1002-7300.2015.08.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-7300.2015.08.016)]
- 34 Xing YX, Zhang DY, Zhao JH, *et al.* Robust fast corner detector based on filled circle and outer ring mask. IET Image Processing, 2016, 10(4): 314–324. [doi: [10.1049/iet-ipr.2014.0952](https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2014.0952)]
- 35 Cho W, Park S, D'Avy J, *et al.* New corner detector using non-cornerness measure. Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia. Seoul, Republic of Korea. 2016. 1–2.
- 36 Rockett PI. Performance assessment of feature detection algorithms: A methodology and case study on corner detectors. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(12): 1668–1676. [doi: [10.1109/TIP.2003.818041](https://doi.org/10.1109/TIP.2003.818041)]
- 37 Awrangjeb M, Lu GJ, Murshed M. An affine resilient curvature scale-space corner detector. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Honolulu, HI, USA. 2007. 1-1233–1-1236.
- 38 洪磊, 嵇保健, 凌超. 一种棋盘格靶标不完整角点识别的修正算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(9): 1521–1526. [doi: [10.3969/j.issn.1003-9775.2016.09.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9775.2016.09.015)]
- 39 Lin XY, Zhu C, Zhang Q, *et al.* Geometric mesh corner detection using triangle principle. Electronics Letters, 2017, 53(20): 1354–1356. [doi: [10.1049/el.2017.1353](https://doi.org/10.1049/el.2017.1353)]
- 40 谢志峰, 吴佳萍, 章曙涵, 等. 基于深度神经网络的烟码智能识别方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(1): 111–117.
- 41 Li YS, Xu JJ, Xia RJ, *et al.* Extreme-constrained spatial-spectral corner detector for image-level hyperspectral image classification. Pattern Recognition Letters, 2018, 109: 110–119. [doi: [10.1016/j.patrec.2018.03.022](https://doi.org/10.1016/j.patrec.2018.03.022)]
- 42 Wang LF, Zhao YN, Qin PL, *et al.* Fast Corner detection based on ORB and GroupSAC in complex scenes video image. Science Technology and Engineering, 2017, 17(2): 88–94.
- 43 刘妍, 余淮, 杨文, 等. 利用 SAR-FAST 角点检测的合成孔径雷达图像配准方法. 电子与信息学报, 2017, 39(2): 430–436.