

DOI: 10.7652/xjtuxb201604011

采用多尺度方向微分比率的角点检测算法

王富平, 水鹏朗

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对相邻图像结构间的相互干扰会导致角点错检率升高的问题,提出了一种基于多尺度方向微分比率(MDDR)的角点检测算法。该算法首先利用 Canny 边缘检测算法提取原始灰度图像的边缘轮廓;对于每一个轮廓像素,分别利用各向同性导数和各向异性高斯方向导数滤波器提取主方向及其正交方向上的方向强度微分信息;然后将 3 个尺度下微分比率融合为 MDDR 测度;最后进行阈值和非极大值抑制处理获得最终角点。不同于传统角点检测算法中只使用单一滤波器,MDDR 算法中使用 2 种不同类型的滤波器,能在精确提取角点附近不同方向微分信息的同时避免邻近图像结构间的相互干扰,从而提高了角点定位准确性并增强了测度的噪声鲁棒性。实验结果表明,MDDR 算法的平均检测准确率比点到弦距离累积算法提高了 27.1%,并且平均错检率比残余面积算法和 Gabor 算法分别低 28.4%和 32.4%。

关键词: 边缘检测;多尺度;方向微分比率;角点检测

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)04-0068-08

A Corner Detection Algorithm Based on Multi-Scale Directional Differential Ratio

WANG Fuping, SHUI Penglang

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A new corner detection algorithm using multi-scale directional differential ratio (MDDR) of images is proposed to solve the problem that the interference between adjacent image structures may lead to the increase of the false detection ratio. The algorithm firstly extracts the image edge contour of an original grayscale image using the Canny edge detection algorithm. The differential information along the principal direction and its perpendicular direction of each contour pixel is extracted by using the isotropic Gaussian directional derivative filter and the anisotropic Gaussian directional derivative filter, respectively. Then, the differential ratios at three scales are fused into the MDDR corner measure. Final corners are then obtained through thresholding the fused measure followed by the non-maximum suppression. The MDDR algorithm is different from traditional corner detection algorithms that use a single filter, it uses two different kinds of filters to precisely extract the differential information along different directions around the corners and to avoid the interference between adjacent image structures. Thus, the corner localization accuracy is improved, and the noise-robustness of corner measures is enhanced. Experimental results and a comparison with the chord-to-point distance accumulation

收稿日期: 2015-09-10。 作者简介: 王富平(1987—),男,博士生;水鹏朗(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271295)。

网络出版时间: 2016-01-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160113.1958.006.html>

algorithm show that the average detection accuracy of the proposed algorithm increases by 27.1%, and the average false detection ratio of the proposed algorithm is 28.4% and 32.4% lower than those of the residual area and Gabor detection algorithms, respectively.

Keywords: edge detection; multi-scale; directional differential ratio; corner detection

在许多图像处理算法中,如图像配准、三维重建等,如果使用图像所有像素的信息,会导致算法计算量十分巨大,而图像中的角点既包含了图像中目标的结构信息,又构成了对图像的稀疏表示,能大大提高图像处理算法的效率,并且角点在几何变换和不同光照条件下具有不变性。因此,角点检测常被作为一些高级图像处理算法的特征提取部分。已有的角点检测算法可以大致分为3类:基于模型的检测算法^[1-3]、基于强度的检测算法^[4]和基于边缘的检测算法^[5-10]。

基于模型的角点检测算法一般根据特定的角点模板来匹配局部图像以达到检测角点的目的。SU-SAN算法^[1]根据模板中心像素与周围像素的相似比来检测角点。FAST算法^[2]和文献^[3]则分别利用圆环和双圆环模板来检测角点。这类算法计算高效,但模板无法覆盖所有角点类型。基于强度的角点检测算法则是根据图像的强度信息直接检测角点。Harris算法根据图像微分自相关矩阵的主曲率在角点与非角点之间的差异来检测角点。文献^[4]则在边缘轮廓的基础上,将多尺度思想融入自相关矩阵中,提高了角点检测准确率。

上述2类算法容易在平坦区域检测到伪角点,而基于轮廓的检测算法则是利用轮廓几何特征来检测角点的^[5-8]。He利用局部支撑区间和自适应阈值改进了曲率尺度空间(CSS)算法^[5],但其对边缘上的噪声十分敏感。Awrangjebp则通过计算多个弦长下的点到弦距离累积(CPDA)的乘积来增强算法的噪声鲁棒性^[6],但其容易丢失距离很近的角点。为此,Teng根据轮廓像素的空间三角特性提出了2种改进算法^[7];Shui在边缘检测的基础上利用各向异性高斯方向导数(ANDD)滤波器来提取轮廓像素的灰度变化信息,并引入归一化残余面积(RA)来检测角点^[9];Zhang则利用Gabor滤波器平滑图像,将获得的归一化微分能量作为角点测度来检测角点^[10]。

以上算法中,基于轮廓的算法对边缘上的噪声比较敏感^[5-6],而结合轮廓和强度的算法中的方向导数滤波器容易受到邻近其他特征的影响^[11]。为了克服上述不足,本文在边缘轮廓提取的基础上,根据

角点和边缘像素的方向微分之间的差异,提出了一种多尺度方向微分比率的角点检测算法,分别利用不同类型的方向导数滤波器精确提取边缘像素的主方向及垂直方向上的微分信息,并将多个尺度下微分比率的乘积作为最终角点测度。实验结果表明,新的角点检测算法能有效避免邻近特征之间的影响,具有更高的检测准确率和很好的噪声鲁棒性。

1 各向同性和各向异性方向导数

传统的高斯微分滤波器由于沿各个方向的尺度都相同,又被称作各向同性方向导数(IGD)滤波器。笛卡尔坐标系下水平方向和方向为 θ_i 的二维IGD滤波器的权值系数可以表示为

$$g'(n; \sigma) = -\frac{n_y}{2\pi\sigma^4} \exp\left(-\frac{n^T n}{2\sigma^2}\right), n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$g'(n; \theta_i) = g'(\mathbf{R}_{\theta_i} n; \sigma)$$

$$\theta_i = \frac{(i-1)}{K} \pi; \mathbf{R}_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix}; i=1, \dots, K \quad (2)$$

式中: σ 是高斯尺度因子; θ_i 是第 i 个滤波器的方向; $\mathbf{R}_{\theta_i}$ 是方向为 θ_i 的旋转矩阵; K 是IGD滤波器的离散方向个数。由于IGD滤波器在提取垂直于边缘方向上的微分时会模糊,因此有学者引入了ANDD滤波器^[9],它是沿其主轴及垂直方向上尺度不同的高斯微分算子。笛卡尔坐标系下水平方向和方向为 θ_i 的二维ANDD滤波器的权值系数可表示为

$$\psi'(n; \sigma, \rho) = -\frac{n_y}{2\pi\sigma^4} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} n^T \begin{bmatrix} \rho^2 & 0 \\ 0 & \rho^{-2} \end{bmatrix} n\right] \quad (3)$$

$$\psi'(n; \theta_i) = \psi'(\mathbf{R}_{\theta_i} n; \sigma, \rho) \quad (4)$$

式中: ρ 为各向异性因子, ρ 越大,滤波器的形状越狭长,所提取的方向微分信息越精确。图1给出了8个方向的二维IGD和ANDD滤波器权值系数图。

2 多尺度方向微分比率的角点检测

结合轮廓和强度的角点检测算法利用方向导数滤波器提取不同方向上的微分信息^[9-10],但当某个角点附近存在其他特征时,提取的微分信息会受到该特征的影响。为了避免这种影响,本文提出了一

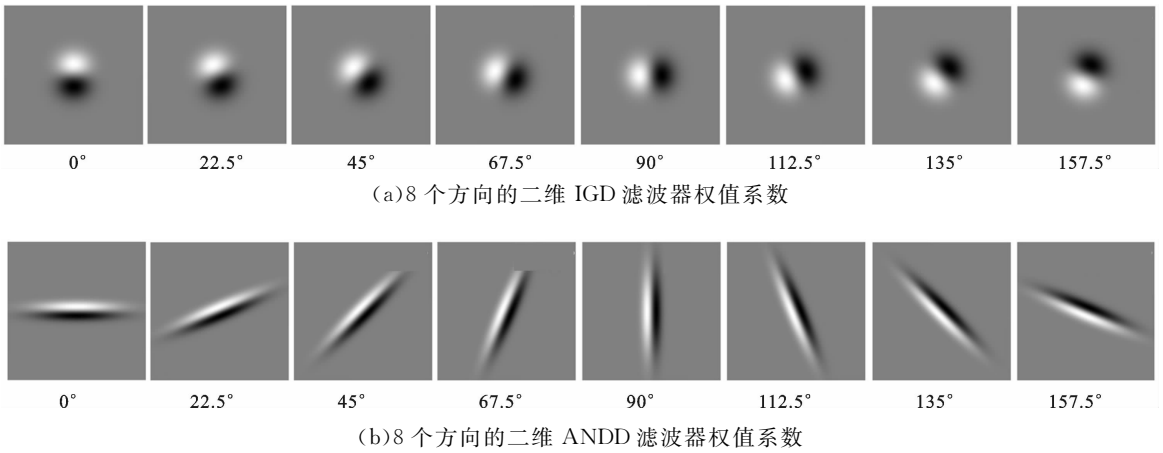


图1 8个方向的二维 IGD 和 ANDD 滤波器权值系数图

种新的角点检测算法,包括2个部分:边缘轮廓的提取和多尺度微分比率(MDDR)测度的构建。

2.1 边缘检测和轮廓修复

本文算法首先利用边缘检测算法提取图像的边缘,但由于噪声的影响,提取的边缘图可能会出现断裂,导致角点丢失或者定位精度降低。因此,对已检测到的边缘做如下处理。

(1)将图像中每一条连通的轮廓 C 以单独链码的形式存储,即 $C=\{p_1, p_2, \dots, p_Q\}$ 。如果 $p_1=p_Q$,则轮廓为封闭轮廓,而当 $p_1 \neq p_Q$ 时,轮廓为开轮廓。

(2)对于开轮廓的端点,如果其 5×5 像素内包含其他轮廓端点,就填充这2个端点之间的间隙,合并这2个轮廓;如果窗口内包含其他轮廓的非端点像素,就将此端点延伸到其他轮廓即可。

对轮廓的修复有助于找回一些丢失角点,同时提高了部分角点的定位精度。

2.2 利用 IGD 和 ANDD 的微分比率的角点测度

对于轮廓上的像素 n 而言,利用 K 个方向的 IGD 和 ANDD 滤波器平滑图像 $I(n)$,得到 K 个响应就构成了 n 处的 IGD 向量 $\nabla I_{\text{IGD}}(n)$ 和 ANDD 向量 $\nabla I_{\text{ANDD}}(n)$

$$\nabla I_{\text{IGD}}(n) = [|I(n) \otimes g'(n; \theta_1)|, |I(n) \otimes g'(n; \theta_2)|, \dots, |I(n) \otimes g'(n; \theta_K)|] \quad (5)$$

$$\nabla I_{\text{ANDD}}(n) = [|I(n) \otimes \psi'(n; \theta_1)|, |I(n) \otimes \psi'(n; \theta_2)|, \dots, |I(n) \otimes \psi'(n; \theta_K)|] \quad (6)$$

式中: $\otimes$ 表示二维卷积。算法中定义 $\nabla I_{\text{ANDD}}(n)$ 中最大值对应的滤波器方向为像素 n 的主方向

$$\theta_k(n) = \arg \max_{\theta_k} \{ |I(n) \otimes \psi'(n; \theta_k)| \} \quad (7)$$

IGD 和 ANDD 滤波器在不同像素处表现出了不同的特性。图2b~2d在极坐标下分别显示了图2a中边缘像素 p_1 、角点 p_2 和边缘像素 p_3 处的 IGD

和 ANDD 向量,其中极坐标的角度代表滤波器的方向。图中 OA 方向就是主方向 θ_k ,对应于第 k 个 ANDD 滤波器的方向,而 OB 为 OA 的垂直方向 $\theta_k - \pi/2$ 。比较图2b和图2c发现,当2种滤波器沿 OA 方向时, p_1 和 p_2 处的响应值都比较大,其中 ANDD 滤波器的响应值更大,而当滤波器沿 OB 方向时, p_2 处的响应明显高于 p_1 处的响应。这是因为对于理想边缘而言,沿边缘方向上的微分为0,而对于角点而言,其结构是各向异性的,沿不同方向的灰度变化都可能很剧烈,因此滤波器沿 OB 方向上的响应值也比较大。根据上述特性,本文提出了基

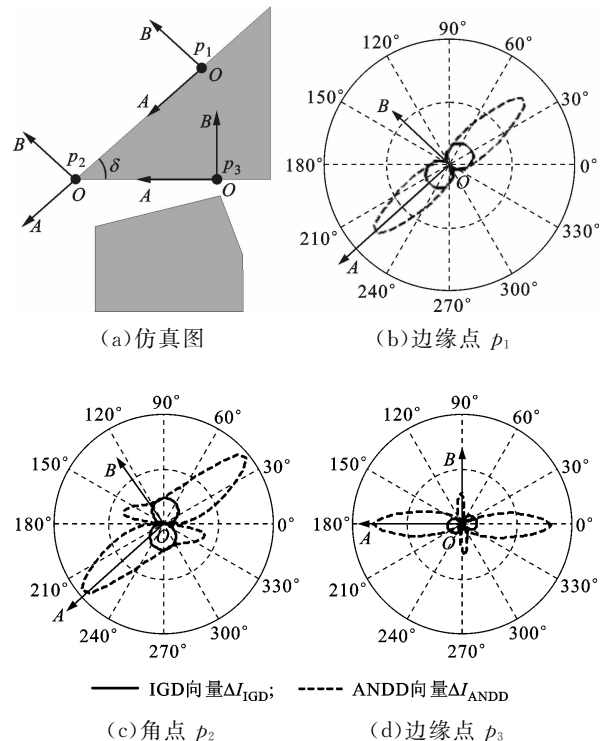


图2 边缘点和角点的 IGD 及 ANDD 向量比较

于微分比率的角度检测,具体就是分别提取像素处 OA 及 OB 上的微分信息,将微分比值作为角点检测。图 2d 显示了 p_3 处的 IGD 和 ANDD 向量。可以看出,由于受到 p_3 点下方其他边缘的影响,当 ANDD 滤波器沿 OB 方向时,其提取的微分明显比较大,而理论上 p_3 点沿 OA 方向上的微分应该接近于 0。相比之下,IGD 滤波器则能很好地提取 OA 方向上的微分。为此,本文使用 IGD 滤波器提取主方向 OA 上的微分信息,而使用 ANDD 滤波器提取其垂直方向 OB 上的微分信息。这样,既能精确地提取 2 个方向的微分信息,又避免了邻近图像结构的影响。

利用 K 个 ANDD 滤波器提取像素 n 的 ANDD 向量,进而根据式(5)获得其主方向 $\theta_k(n)$ 及 OB 方向上的微分。然后构建 $\theta_k(n) - \pi/2$ 方向上的 IGD 滤波器并平滑图像,从而提取 OA 方向上的微分信息。为了增强角点检测的噪声鲁棒性, OB 方向上的微分需要平均 θ_k 附近 $2L+1$ 个离散方向上的 ANDD 响应,而 OA 方向上的微分则需要平均 $\theta_k - \pi/2$ 附近 $2L+1$ 个方向上的 IGD 响应,那么尺度 σ 下的角点检测就定义为这 2 个微分均值的比值,表达式为

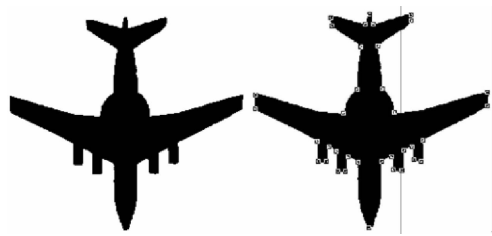
$$\gamma_{\sigma}(n) = \frac{\sum_{i=k-L}^{k+L} |I(n) \otimes g'(n; \sigma, \theta_i - \pi/2)|}{\sum_{i=k-L}^{k+L} |I(n) \otimes \psi'(n; \sigma, \theta_i)|} \quad (8)$$

小尺度微分滤波器具有好的定位准确性,但对噪声比较敏感;大尺度滤波器对噪声比较鲁棒,但其会降低角点定位精度。为了融合两者的优点,本文提出的 MDDR 检测度定义为 3 个尺度下的 γ_{σ} 的乘积,即

$$\eta_{\text{MDDR}}(n) = \gamma_{\sigma_1}(n) \gamma_{\sigma_2}(n) \gamma_{\sigma_3}(n), \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad (9)$$

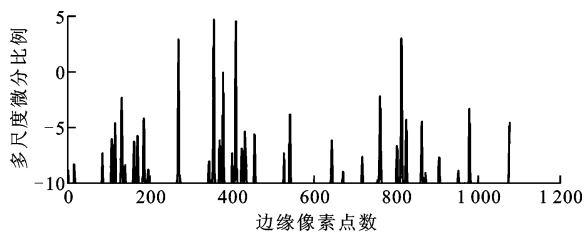
实际上,MDDR 检测度所描述的就是像素处主曲率方向上与其垂直方向的微分变化。类似思想最早在 Harris 中被用到,但在 Harris 算法中只用到了 x, y 方向的 IGD 滤波器的响应,提取的主曲率不够精确,并且 Harris 检测度对噪声比较敏感。

为了说明 MDDR 检测度的有效性,对图 3a 中包含 36 个真实角点的飞机图像,利用本文算法计算出每个边缘像素处的 MDDR 检测度。从图 3c 可以看出,该检测度在角点处明显比较大,并且可以区分距离较近的角点,而在非角点处几乎为 0。只需设置合适的阈值,就能检测出所有角点(如图 3b)。



(a) 仿真图像

(b) 本文算法检测



(c) 飞机图像的 MDDR 检测度

图3 飞机图像的 MDDR 检测度及检测结果

2.3 本文算法流程

本文提出的基于多尺度微分比率的角度检测算法的详细步骤如下。

步骤1 利用 Canny 边缘检测算法提取灰度图像的边缘轮廓,对每一个轮廓进行填充或者延伸修复。

步骤2 构建尺度 σ_1 下 K 个方向的 ANDD 滤波器,并平滑轮廓上的每一个像素 n ,获得 $\nabla I_{\text{ANDD}}(n)$ 、 OB 方向上的平均微分 $\theta_k(n)$ 。

步骤3 构建 $\theta_k(n) - \pi/2$ 附近 $2L+1$ 个方向的 IGD 滤波器,并平滑像素 n 获得 OA 方向上的平均微分。

步骤4 将得到的主方向和垂直方向上的微分代入式(8)中,计算尺度 σ_1 下的角点检测度 $\gamma_{\sigma_1}(n)$ 。

步骤5 根据 σ_1 下获得的主方向 $\theta_k(n)$ 来构建 σ_2, σ_3 下的 $2L+1$ 个 ANDD 和 IGD 滤波器,并计算各自尺度下的角点检测度,然后代入式(9)得到最终的多尺度下融合的角度检测度 $\eta_{\text{MDDR}}(n)$ 。

步骤6 对于每一个边缘像素,如果其角点检测度 $\eta(n)$ 大于设定的阈值 t 并且是 5×5 像素窗口内的最大值,就认定其为最终角点,否则将其剔除。

3 实验结果和分析

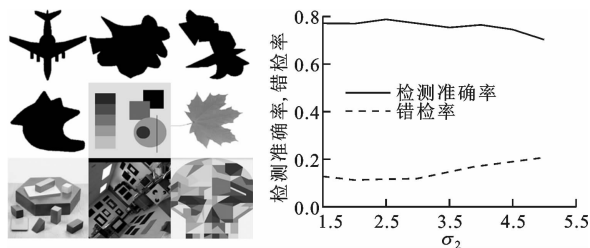
为了评价提出的算法的性能,分别通过真实图像检测结果、定位误差及重复率实验进行评估。对于算法中的 ANDD 滤波器而言, ρ 越小,滤波器的影响范围越小,其区分邻近角点的能力就越强,但主方向的精确估计又要求滤波器具有强的各向异性,此时需要 $\rho > 2^{[12]}$ 。为了兼顾两者,本文使用文献

[12]中的推荐参数 $\rho = (6)^{1/2}$ 。为了获得最优的角度分辨率,滤波器方向采样数 K 必须满足^[9]

$$K \geq 3\pi \arcsin^{-1}((2\rho^4 - 2)^{-1/2}) \quad (10)$$

将 $\rho = (6)^{1/2}$ 代入式(10)可以计算出最小方向数 $K \approx 84$ 。进行局部微分平均时的滤波器方向数 $2L+1=3$ 。

本文的角点测度与角点两侧直线的夹角 δ 有关(如图 2a 所示):当 δ 为 90° 时,角点测度为 1;当 δ 减小至 0° 或者增加至 180° (即理想边缘)时,测度接近于 0。然而,实际中受到边缘噪声的影响,非角点处的夹角往往不严格等于 180° ,因此,在 CPDA 算法^[6]中,当边缘像素处的夹角满足 $180^\circ - 157^\circ < \delta < 157^\circ$ 时,该像素就被认定为角点。将该夹角 δ 代入文献[9]中的通用角点模型中计算出特定夹角的理想角点,利用式(6)和式(7)计算出本文角点测度的范围为 $0.022 < \eta \leq 1$ 。因此,要检测出所有角点,阈值 t 应该在 $[0, 0.022]$ 上取值,但如果阈值过小,错误角点检测率就会增加,为此,本文在实验中选择了经验阈值 $t=0.02$ 。为了选择合适的尺度 σ ,对于图 4a 中公认的包含真实参考角点的 9 幅图像^[5,9],在不同的尺度 σ 下计算其平均检测正确率和平均错检率。实验中 σ_2 在区间 $[1.5, 5]$ 上均匀采样,其他 2 个尺度则满足 $\sigma_1/(2)^{1/2} = \sigma_2 = (2)^{1/2} \sigma_3$,最终结果如图 4b 所示。可以看出,在尺度 $\sigma_2=2.5$ 时算法获得了最高的检测准确率和最小的错检率。尺度参数取值区间可以为 $[2, 3]$,本文中 σ_2 取值为 2.5。



(a) 实验图像 (b) 检测率随 σ_2 的变化

图 4 检测准确率和错检率随尺度 σ_2 的变化

3.1 算法有效性实验

本实验针对飞机和实验室图像,分别在无噪声和含噪声标准差 $\epsilon=152$ 的情况下,利用 CPDA 算法^[6]、RA 算法^[9]、Gabor 算法^[10]和本文算法检测图像角点,统计其配准角点和错误角点数目,并计算定位误差。其他 3 种算法由原作者提供,参数设置为原文中的默认参数,本文算法的参数是: $K=84$, $\rho=6^{1/2}$, $\sigma_1=2.5 \times 2^{1/2}$, $\sigma_2=2.5$, $\sigma_3=2.5/2^{1/2}$, $t=0.02$ 。分别采用 4 种算法在无噪声时的检测结果如图 5 和

图 6 所示,含噪声时的检测结果如图 7 和图 8 所示。可以看出,CPDA 算法丢失了许多真实角点,主要原因是 CPDA 算法中使用的 3 个弦长对 CPDA 曲率具有平滑作用,当相邻角点之间的距离小于一定像素时,平滑效果会使得 CPDA 测度无法区分这 2 个角点,而基于 RA 和基于 Gabor 的 2 种算法中使用的方向导数滤波器提取的局部微分向量具有很强的角点区分能力,使得图 5b 和图 5c 中的配准角点数

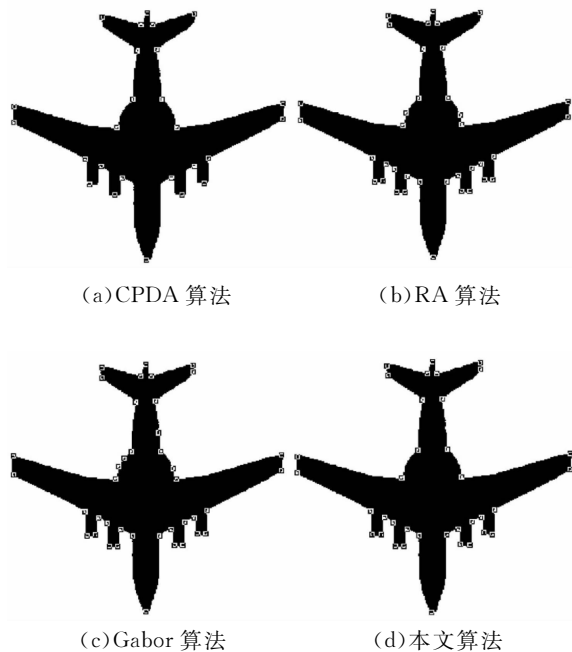


图 5 4 种算法在无噪声下对飞机图像的检测结果

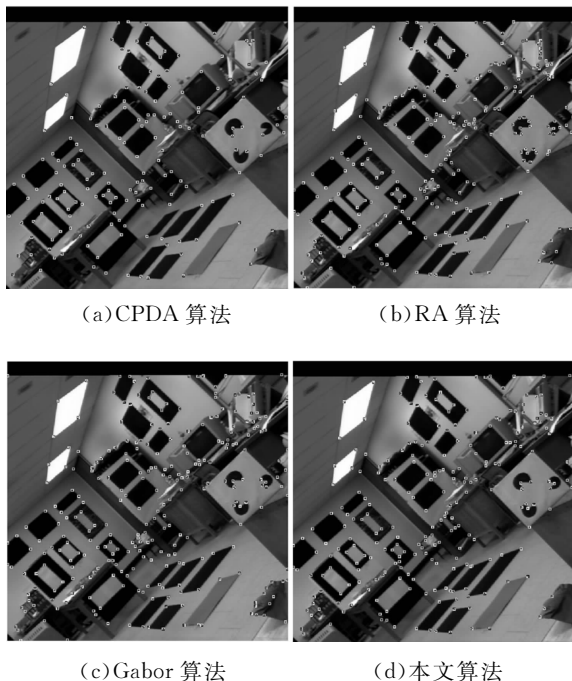


图 6 4 种算法在无噪声下对实验室图像的检测结果

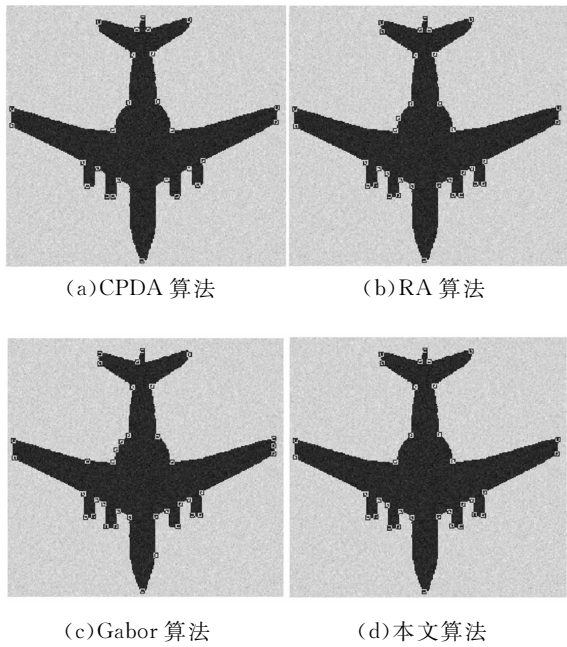


图 7 4 种算法在含噪声 $\epsilon=15$ 下对飞机图像的检测结果

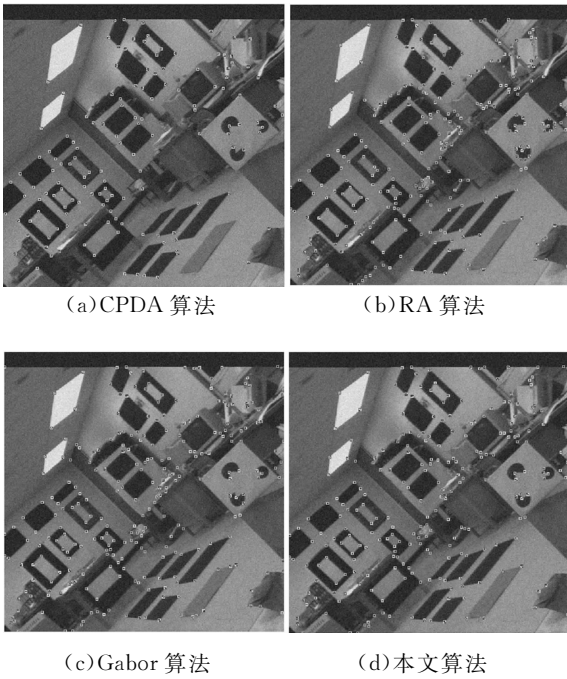


图 8 4 种算法在含噪声 $\epsilon=15$ 下对实验室图像的检测结果

目明显比 CPDA 多。然而,由于它们的测度是建立在多个方向微分的基础上,当滤波器垂直于轮廓方向时,滤波器狭长的空域影响范围使其容易受到周围其他轮廓以及边缘毛刺的影响,从而在边缘或者圆形轮廓上产生伪角点,而图 5d 中本文算法能够准确地识别邻近角点,并且检测出最少的伪角点。这是由于本文算法通过精确估计边缘像素的主方向,利用空域影响范围较小的 IGD 导数滤波器提取主方向上的微分,避免了邻近图像的影响,降低了伪角

点产生的概率。

表 1 和表 2 分别给出了无噪声和含噪声情况下的检测结果统计,其中噪声情况下的结果是 50 次检测结果排序后的中值。从表 1 中可以看出,无噪声情况下,CPDA 算法的错误角点数最少。这主要得益于 CPDA 测度中多个弦长的平滑效果使得算法对边缘上的噪声十分鲁棒,但 CPDA 测度也容易平滑掉相距很近的真实角点,导致其配准角点数很少。RA、Gabor 和本文算法的配准角点数比较接近,但 RA 和 Gabor 算法中微分滤波器的空域范围较大,提取的方向微分容易受到邻近图像结构的影响,导致伪角点增多,而本文算法中使用大尺度的 ANDD 滤波器提取垂直于边缘方向上的微分,其对边缘上的噪声比较鲁棒,使得检测的错误角点数明显比 RA 和 Gabor 少,同时小尺度下角点测度的定位准确度较高,使得最终融合的角点测度的定位误差也相对比较小。表 2 的结果显示,噪声情况下,CPDA 和本文算法的配准角点和错误角点数变化不大,表明算法对噪声都比较鲁棒。与本文算法相比,RA 算法的错误角点数增多,Gabor 算法的配准角点数减少,错误角点数增多。本文算法在提取垂直于边缘方向上的微分时使用了大尺度的 ANDD 滤波器,使其对图像中的噪声比较鲁棒。为了验证算法的噪声鲁棒性,对于图 4a 中的 9 幅图像,分别在不同标准差的零均值高斯噪声下,计算 4 种算法的配准率和错检率。实验中,噪声标准差 ϵ 在 $[2,20]$ 上等间

表 1 无噪声下 4 种算法对飞机和实验室图像的检测结果比较

检测算法	配准角点数		错误角点数		定位误差/像素	
	飞机	实验室	飞机	实验室	飞机	实验室
CPDA	25	161	1	33	1.56	1.44
RA	35	179	2	69	0.81	1.48
Gabor	36	189	4	71	0.97	1.66
本文算法	36	181	0	53	0.92	1.44

注:黑体数据为最优检测结果。

表 2 含噪声标准差 $\epsilon=15$ 下 4 种算法对飞机和实验室图像的检测结果比较

检测算法	配准角点数		错误角点数		定位误差/像素	
	飞机	实验室	飞机	实验室	飞机	实验室
CPDA	25	160	1	33	1.69	1.59
RA	35	176	2	89	0.84	1.70
Gabor	32	167	6	99	0.98	1.89
本文算法	35	173	0	59	0.98	1.62

隔采样,进行50次实验的平均检测结果如图9所示。从图9a中可以看出,随着噪声的增加,本文算法和CPDA算法的平均错检率都增加的比较少,而RA和Gabor的错检率明显增加。对于图9b中的平均配准率而言,本文算法、CPDA和RA算法的配准率下降得都比较少,而Gabor算法的配准率明显下降。相比之下,CPDA算法的配准率和错检率变化都最小。综上所述,CPDA算法的噪声鲁棒性最好,其次是本文算法,RA算法次之,而Gabor算法对噪声比较敏感。

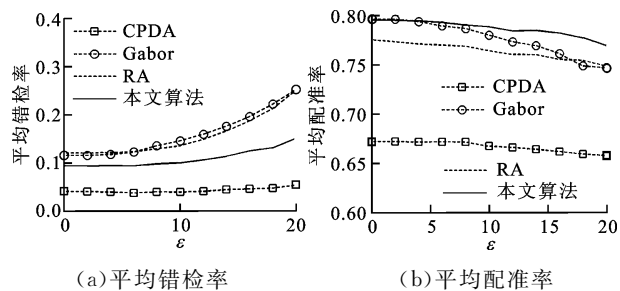


图9 不同噪声下4种算法的检测结果

3.2 重复率实验

重复率也是衡量算法性能的一个重要指标。假设原始和变换后图像中检测到的角点数为 N_0 和 N_T , 其中重复角点数为 N_r , 则角点重复率 $R_s = (N_r/N_0 + N_r/N_T)/2$ 。实验中计算文献[10]中的24幅图像在3种仿射变换和噪声干扰下的平均重复率。具体包括:旋转变换中角度在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 上采样;一致尺度变换中对 X 、 Y 坐标进行相同尺度缩放的尺度因子在 $[0.5, 2]$ 上采样;非一致尺度变换中对 Y 坐标进行缩放的尺度因子在 $[0.5, 2]$ 上采样;高斯噪声干扰中标准差在 $[1, 15]$ 上采样。

4种算法的平均重复率如图10所示,由于旋转变换没有改变局部图像的强度分布,使得检测得到的边缘几乎不变,因此4种算法在旋转变换下重复率变化不大。一致尺度变换改变了图像大小,对边缘检测结果产生了影响,导致4种算法的平均重复率都下降了,而本文算法融合了多尺度下的信息,具有一定的尺度鲁棒性,其重复率一直最高。非一致尺度变换下,角点处的边缘轮廓的夹角发生了变化,这使得4种算法的重复率都有明显的下降,其中边缘轮廓的改变对于只利用轮廓几何信息的CPDA算法影响最大,使其重复率最低,而且大的非一致尺度变换使得邻近轮廓更接近,此时RA和Gabor算法更容易受到角点周围其他结构的影响,导致伪角点产生。本文算法利用空域影响范围较小的IGD

滤波器提取主方向上的微分,不易受到周围其他轮廓的影响,并且由于本文算法只利用了像素的主方向及其垂直方向上的微分信息,对非一致尺度变换不敏感,从而具有最高的重复率。在高斯噪声干扰下,Gabor算法的重复率最低,这是由于Gabor滤波器对于噪声导致的边缘毛刺和灰度不均匀都比较敏感,导致提取的归一化能量容易在非角点处产生强响应,其他3种算法的重复率比较接近。综合结果表明,本文算法具有较好的检测重复率。

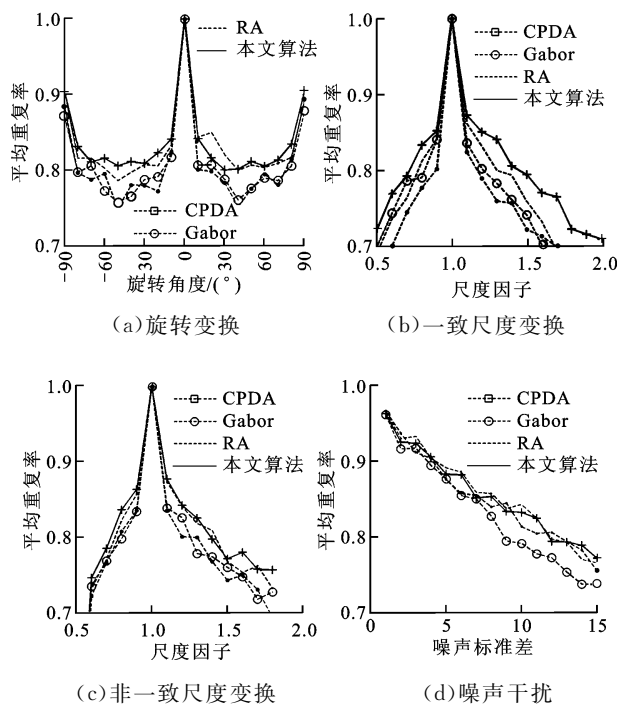


图10 3种仿射变换和噪声干扰下4种算法的平均重复率比较

4 结论

本文在提取轮廓的基础上,提出了一种融合多尺度方向微分比率的角点检测算法。算法根据边缘和角点处微分特性的不同,充分利用了IGD和ANDD滤波器的优势来精确提取局部微分信息,增强了角点测度的稳定性。通过将多尺度思想融合到最终角点测度中,提高了角点定位准确性并增强了噪声鲁棒性。对角点配准率、错检率、噪声鲁棒性和重复率等的实验结果表明,本文算法具有较高检测准确率、更小的错检率和较好的噪声鲁棒性。

参考文献:

- [1] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN-A new approach to low level image processing [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.

- [2] ROSTEN E, POTER R, DRUMMOND T. Faster and better: a machine learning approach to corner detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(1): 105-119.
- [3] LAN J, ZHANG M. Fast and robust corner detector based on double-circle mask [J]. Optical Engineering, 2010, 49(12): 1-8.
- [4] 王浩, 周祚峰, 曹剑中, 等. 基于边缘轮廓上多尺度自相关矩阵的角点检测 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(6): 1220-1224.
WANG Hao, ZHOU Zuofeng, CAO Jianzhong, et al. Corner detection via multi-scale autocorrelation matrix on edge contours [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(6): 1220-1224.
- [5] HE X C, YUNG N H C. Corner detector based on global and local curvature properties [J]. Optical Engineering, 2008, 47(5): 1-12.
- [6] AWRANGJEB M, LU G J. Robust image corner detection based on the chord-to-point distance accumulation technique [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2008, 10(6): 1059-1072.
- [7] TENG S W, SADAT R M, LU G J. Effective and efficient contour-based corner detectors [J]. Pattern Recognition, 2015, 48(7): 2185-2197.
- [8] 邢远秀, 章登义, 赵俭辉. 利用多尺度弦角尖锐度累积的自适应角点检测算子 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2015, 40(5): 617-622.
- XING Yuanxiu, ZHAO Dengyi, ZHAO Jianhui. An adaptive threshold corner detector based on multi-scale chord-angle sharpness accumulation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(5): 617-622.
- [9] SHUI P L, ZHANG W C. Corner detection and classification using anisotropic directional derivative representations [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(8): 3204-3218.
- [10] ZHANG W C, WANG F P. Corner detector using Gabor filters [J]. IET Image Processing, 2014, 8(11): 639-646.
- [11] 章为川, 水鹏朗, 朱磊. 利用各向异性高斯方向导数相关矩阵的角点检测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(11): 91-97.
ZHANG Weichuan, SHUI Penglang, ZHU Lei. A corner detection algorithm using anisotropic Gaussian directional derivatives autocorrelation matrix on edge contours [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(11): 91-97.
- [12] ZHANG W C, SHUI P L. Contour-based corner detection via angle difference of principal directions of anisotropic Gaussian directional derivatives [J]. Pattern Recognition, 2015, 48(9): 2785-2797.

(编辑 刘杨)

(上接第 59 页)

- [4] SCHMIDT K. Binary sequences with small peak sidelobe level [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(4): 2512-2515.
- [5] 杜晓林, 王旭, 苏涛, 等. MIMO 雷达正交相位编码信号的代数设计方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(2): 64-70.
DU Xiaolin, WANG Xu, SU Tao, et al. Orthogonal phase coding signal design for MIMO radar via an algebraic method [J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(2): 64-70.
- [6] NUNN C. Constrained optimization applied to pulse compression codes and filters [C] // Proceeding of IEEE 2005 International Radar Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 190-194.
- [7] CARROLL N, KRETSCHMER F F. Performance of pulse compression code and filter pairs optimized for loss and integrated sidelobe level [C] // Proceedings of IEEE 2007 International Radar Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 110-115.
- [8] WANG Yongchao, WANG Xu, LIU Hongwei, et al. On the design of constant modulus probing signals for MIMO radar [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(8): 4432-4438.
- [9] ANTONIOU A, LU W S. Practical optimization: algorithm and engineering applications [M]. Berlin, Germany: Springer, 2007.
- [10] ZHOU Shenghua, LIU Hongwei, WANG Xu, et al. MIMO radar range-angular-Doppler sidelobe suppression using random space-time coding [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(3): 2047-2060.
- [11] SONG Xiufeng, ZHOU Shengli, WILLETT P. Reducing the waveform cross correlation of MIMO radar with space-time coding [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(8): 4213-4224.
- [12] GRANT M, BOYD S, YE Y. CVX: Matlab software for disciplined convex programming [CP/OL]. [2015-03-12]. <http://www.stanford.edu/~boyd/cvx>.

(编辑 刘杨)