

# 基于 Sobel 边缘检测的圆周 Harris 角点检测算法

董立红 彭业勋 符立梅

(西安科技大学 计算机科学与技术学院 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 特征点的选取是视觉研究的基础,其选取的精确度直接影响到视觉信息处理的准确性与可靠性。传统 Harris 角点检测方法具有计算简单、易于实现的优点,但该算法效率低下、检测精度较低、抗噪性差、存在角点簇。提出一种基于 Sobel 边缘检测的圆周 Harris 角点检测算法:首先采用 Sobel 边缘检测进行角点预筛选,本质上提高检测效率;随后采用圆周窗口模板对筛选后的角点进行非极大值抑制,减少漏检点与伪角点的个数;最后采用临近点剔除法,保留非极大值最大点作为角点,解决角点簇问题。实验结果表明,文中角点检测算法运行效率得到了极大提高,减低漏检率的同时,旋转不变性亦得到了改善。

**关键词:** 角点检测;改进 Harris 算法;旋转不变性;圆周窗口

中图分类号: TP 391.41

文献标志码: A

DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdxhb.2019.0227

文章编号: 1672-9315(2019)02-0374-07

## Circular Harris corner detection algorithm based on Sobel edge detection

DONG Li-hong, PENG Ye-xun, FU Li-mei

(College of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The selection of feature points is the basis of visual research, and the accuracy of its selection directly affects the accuracy and reliability of visual information processing. The traditional Harris corner detection method has the advantages of simple calculation and easy implementation. However, the algorithm has low efficiency, low detection precision, poor noise resistance and corner clusters. In this paper, a circumferential Harris corner detection algorithm based on Sobel edge detection is proposed. Firstly, Sobel edge detection is used to perform corner point pre-screening, which improves the detection efficiency in essence. Then, the circumferential window template is used to suppress the non-maximum value of the selected corner points to reduce the number of missed detection points and pseudo corner points. Finally adopt the adjacent point culling method, retain the non-extreme maximum point as the corner point and solve the corner point cluster problem. The experimental results show that the running efficiency of the corner detection algorithm is greatly improved, and the rotation invariance is also improved while reducing the missed detection rate.

**Key words:** corner detection; improved Harris algorithm; rotation invariance; circumferential window

收稿日期: 2018-09-26

责任编辑: 高 佳

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2016M602941XB)

通信作者: 董立红(1968-),女,河北丰南人,博士,教授, E-mail: donger@vip.163.com

## 0 引言

图像亮度发生剧烈变化,亦或者图像边缘曲线上曲率的极大值点<sup>[1]</sup>,称之为角点。角点是在图像处理中的一个重要特征,它主要运用到运动目标识别和跟踪、图像匹配等计算机视觉领域。角点检测的精确度,直接决定了识别、跟踪及匹配结果的好坏,因此角点检测是计算机视觉处理中十分重要的环节。

Harris 算法是一种传统的角点检测算法,它是在 Moravec 算法的基础上,由 Harris C 和 Stephens M 两人在 1988 年改进发展而来的。Harris 角点检测存在一些不足,如需人工设置阈值<sup>[2]</sup>,存在伪角点、角点簇,角点定位不精确以及检测效率低下。针对 Harris 角点的信息丢失和位置偏移问题,2009 年毛雁明、兰美辉等人提出了双阈值的想法,根据 2 次非极大值抑制,结合一定区域内有一个角点的方法,确定角点,但是并没有解决人工阈值选取<sup>[3]</sup>。对于定位不精确的问题,2013 年张晶等提出 B 样条函数来代替传统算法算法中的高斯平滑函数,进而改进了窗口大小选择困难的问题,提高了定位精度<sup>[4]</sup>。2015 年龚平、刘相滨提出了运用像素点响应值进行曲线拟合的方法,根据峰值来确定角点,解决了人工阈值选取带来的角点分布不均现象<sup>[5]</sup>。2015 年邹志远等人提出了一种自适应阈值的方法,对人工选取阈值得到的改善,从而避免人工选取阈值造成的角点分布不合理的现象<sup>[6]</sup>。2016 年赵萌等人提出了一种高斯函数参数自适应的 Harris 角点检测算法<sup>[7]</sup>,解决了高斯函数参数选取的不确定性影响。由于人工设置阈值易产生角点簇的现象,2017 年张见双等人提出了一种改进的算法<sup>[8]</sup>,通过图像分块处理,并在每个图像块中进行自适应阈值设置<sup>[9-10]</sup>的方法,改善了角点簇现象。

针对 Harris 算法的不足,上述提到的不同方法都取得了一定的成效,但均不同程度地降低了检测算法的运算效率,如何在提高检测算法效率的同时,降低误检测的率成为文中的研究方向。文中提出运用 Sobel 边缘检测<sup>[11-12]</sup>来备选角点来提高检测效率;在进行非极大值抑制时,文中把传统的矩形模板改为圆周模板,该模板具有旋转不变性,大大改善了图像角点的检测精度,最后采用邻域内临近角点剔除<sup>[13-14]</sup>的方法,排除角点簇,进一

步提高检测的精确度。

## 1 Harris 角点检测

### 1.1 Harris 角点检测原理

Harris 算法是一种传统的角点检测算法,角点就是二维图像灰度值的突变或者图像边缘的交线的轮廓点,在对图像  $I(x, y)$  进行移动时,当移动距离是  $(\Delta x, \Delta y)$ ,可根据自相关函数给出公式

$$c(x, y; \Delta x, \Delta y) = \sum_{(u, v) \in W(x, y)} w(u, v) (I(u, v) - I(u + \Delta x, v + \Delta y))^2 \quad (1)$$

式中  $(x, y)$  为中心图像;  $w(x, y)$  为加权函数,一般为高斯加权函数。

一般我们把上式中  $I(u + \Delta x, v + \Delta y)$  进行一阶的泰勒展开

$$I(u + \Delta x, v + \Delta y) = I(u, v) + I_x(u, v) \Delta x + I_y(u, v) \Delta y + O(\Delta x^2, \Delta y^2) \approx I(u, v) + I_x(u, v) \Delta x + I_y(u, v) \Delta y \quad (2)$$

式中  $I_x, I_y$  分别为  $I(x, y)$  在  $x$  轴方向上和  $y$  轴方向上的一阶偏导数,由以上(2)代入式(1)可得

$$c(x, y; \Delta x, \Delta y) \approx \sum_w (I_x(u, v) \Delta x + I_y(u, v) \Delta y)^2 = [\Delta x, \Delta y] M(x, y) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中

$$M(x, y) = \sum_w \begin{bmatrix} I_x^2(x, y) & I_x(x, y) I_y(x, y) \\ I_x(x, y) I_y(x, y) & I_y^2(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_w I_x^2(x, y) & \sum_w I_x(x, y) I_y(x, y) \\ \sum_w I_x(x, y) I_y(x, y) & \sum_w I_y^2(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix} \quad (4)$$

可以简单理解为图像发生平移后,其自相关函数变成了近似的二项式函数

$$c(x, y; \Delta x, \Delta y) \approx A \Delta x^2 + 2C \Delta x \Delta y + B \Delta y^2 \quad (5)$$

式中

$$A = \sum_w I_x^2, B = \sum_w I_y^2, C = \sum_w I_x I_y$$

二次函数就是一个椭圆函数,它的扁率和尺寸是由矩阵  $M(x, y)$  的特征值决定的,假设它的特征值<sup>[15-16]</sup>分别为  $\lambda_1, \lambda_2$ ,当它的大小可分为 3 种情况

1) 当 2 个特征值差距很大时,即  $\lambda_1 \gg \lambda_2$  亦或

者  $\lambda_2 \gg \lambda_1$ , 表明自相关系数在一个方向上大, 在其他方向上小, 是图像中的一条直线;

2) 2 个特征值相似且比较小, 表明其在各个方向上的自相关系数都小, 是图像的平面区域;

3) 2 个特征值都比较大, 而且近似, 自相关函数在所有的方向上都增大, 即为角点。

但是在进行读图像的角点检测时, 特征值的计算量十分的大, 一般运用特征点的响应函数<sup>[17-18]</sup>  $CRF$  来计算。

$$CRF = \det M - k(\text{trace} M)^2 \quad (6)$$

式中  $\det M$  为  $M$  的行列式;  $\text{trace} M$  为矩阵  $M$  的迹;  $CRF$  为角点的响应函数;  $k$  为常数, 一般取  $k \in (0.04, 0.06)$ 。响应函数  $CRF$  值大于预先设定的阈值, 且为局部最大值, 我们称这个点为候选角点。

## 1.2 Harris 算法步骤及不足

通过对 Harris 角点检测的理解分析, 可将其过程分为 3 部分

1) 首先应该求出矩阵  $M$  以及分别在  $x$  轴(水平方向)、 $y$  轴(垂直方向)上的梯度;

2) 对图像做高斯滤波<sup>[19-20]</sup>处理, 求出新的矩阵  $M$ ;

3) 计算出每个 Harris 角点的响应值  $CRF$ , 对局部邻域进行非极大值抑制, 与给定阈值进行比较, 大于阈值的角点设置为角点。

Harris 角点检测有许多不足之处, 比如人工设置阈值、抗躁性差、易产生角点簇、伪角点, 及其运算时间长等缺点。

## 2 圆周 Harris 角点检测

文中提出的圆周 Harris 角点检测算法, 首先采用 Sobel 边缘检测的方法来获取备选角点, 以此来提高检测效率并剔除部分伪角点; 随后, 对于圆周模板的旋转不变性<sup>[21-22]</sup>, 提出了圆周模板来代替传统的矩形模板, 提高了角点的检测精度; 最后对于角点簇, 文中采用邻近角点剔除的方法, 剔除伪角点和角点簇, 进一步提高了算法的检测精度。

### 2.1 备选角点的选取

通过对角点定义易得, 角点一定在图像的边缘上, 因此文中采用 Sobel 边缘检测算法对图像进行边缘检测, 设置一个阈值(文中 Sobel 中阈值为 150), 当某一像素的梯度值大于阈值时, 文中认为它就是边缘, 否则认为其不是边缘, 把检测到的边缘当做备选角点, 从而为后来 Harris 角点检测减少

了运行时间。文中采用积木图作为实验原图(如图 1(a) 所示), 通过 Sobel 边缘算法进行备选角点, 由于只在积木的边缘点进行检测故得到 5 141 个角点(如图 1(b) 所示)。原图积木图为  $256 * 256 = 65\ 536$  个像素点, 备选角点远小于原积木的像素点个数, 运行个数约为原来的 7.84%, 极大地减少了运行时间。

Sobel 算子包含 2 组(横向和纵向)  $3 * 3$  的矩阵, 它们分别在  $x$  方向和  $y$  方向与原图像进行平面卷积, 为了得出  $x$  方向及  $y$  方向的亮度差分近似值。假设我们把  $A$  作为我们的原始图像,  $G_x$  及  $G_y$  分别为方向  $x$  及方向  $y$  的图像, 其公式如下

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

计算每一个像素的梯度大小, 可以用  $G_x$  和  $G_y$  近似值可得公式如下

$$G = \sqrt{(G_x)^2 + (G_y)^2} \quad (8)$$

当梯度  $G$  大于给定阈值时(文中选取阈值为 150), 文中认为该点就是边缘检测点, 即备选角点。

### 2.2 圆周非极大值抑制窗口

Harris 角点检测的灰度相关矩阵为

$$M = G(\sigma) \otimes \begin{pmatrix} I_u^2 & I_u I_v \\ I_u I_v & I_v^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

角点检测判别式为

$$CRF = \det M - k(\text{trace} M)^2 \quad (10)$$

图片  $I$  经过旋转、平移、缩放后  $I' = h \cdot S \cdot I + \beta$ , 其中  $G(\sigma)$  为卷积函数;  $h$  为标量, 表明缩放的比例大小;  $S$  为旋转矩阵;  $\beta$  为偏移量。变换后的坐标变换关系为

$$\begin{cases} u' = u \cdot h \cdot \cos\theta - v \cdot h \cdot \sin\theta + \beta_1 \\ v' = u \cdot h \cdot \sin\theta + v \cdot h \cdot \cos\theta + \beta_2 \end{cases} \quad (11)$$

一阶导数关系

$$\begin{cases} I_u = I_{u'} \cdot h \cdot \cos\theta - I_{v'} \cdot h \cdot \sin\theta \\ I_v = I_{u'} \cdot h \cdot \sin\theta + I_{v'} \cdot h \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (12)$$

式中  $I_u, I_v$  为图像在  $u$  和  $v$  方向的偏导数。

将矩阵窗函数变成一维向量, 利用相关矩阵表示相关矩阵  $M$ , 在原图像中  $I_u$  加权后利用一维向量表示为  $a$ ,  $I_v$  加权后用一维向量表示为  $b$ , 同理  $I_{u'}, I_{v'}$  变换后用  $a', b'$  来表示。公式如下所示

$$\begin{cases} a = a' \cdot h \cdot \cos\theta - b' \cdot h \cdot \sin\theta \\ b = a' \cdot h \cdot \sin\theta + b' \cdot h \cdot \cos\theta \end{cases}$$

$$(a \ b) = h \cdot (a' \ b') \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (13)$$

原图像的相关矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} a^T \cdot a & a^T \cdot b \\ b^T \cdot a & b^T \cdot b \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} a^T \\ b^T \end{pmatrix} \cdot (a \ b) \quad (14)$$

带入可得

$$M = \begin{pmatrix} a^T \\ b^T \end{pmatrix} \cdot (a \ b) = h^2 \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a^T \\ b^T \end{pmatrix} \cdot (a' \ b') \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (15)$$

由于变换后的灰度相关性为

$$M' = \begin{pmatrix} a'^T \\ b'^T \end{pmatrix} \cdot (a' \ b') \quad (16)$$

故变换后的灰度相关矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} a^T \\ b^T \end{pmatrix} \cdot (a \ b) = h^2 \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot M' \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (17)$$

当  $h=1$  时,即发生平移和旋转时,变换前后的矩阵是相似的,故其行列式  $\det$  和迹  $\text{trace}$  不发

生改变,所以旋转和平移后判别式没有影响。

当  $h \neq 1$  时,即缩放变换,变换后的矩阵不相似,故 Harris 角点检测不具有尺度不变性。

在一般的 Harris 检测中,一般选用  $3 \times 3$  的模板(如图 2(a)所示)进行与周围的 8 邻域进行比较角点响应值,只有当 8 邻域响应值均小于中心点时,认为此时的中心点是该模板中的极大值点。在传统的算法中,由于非极大值抑制窗口为矩形,当图像发生旋转时,非极大值抑制窗口内的值将会发生变化,对于检测的角点的非极大值抑制也会随之改变(如图 2(b)所示),因此文中提出圆周非极大值抑制窗口方法(如图 2(c)所示),通过圆周上像素点与中心点的比较来确定角点,当中心点的角点响应值大于圆周上所有的值时,认为此时的中心点就是角点。由于圆周上各点到中心点距离相等,当图像发生旋转时,圆周上的点不会发生变化,进而模板内的非极大值抑制也不会改变(如图 2(d)所示),因此文中提出的圆周非极大值抑制窗口算法具有旋转不变性。

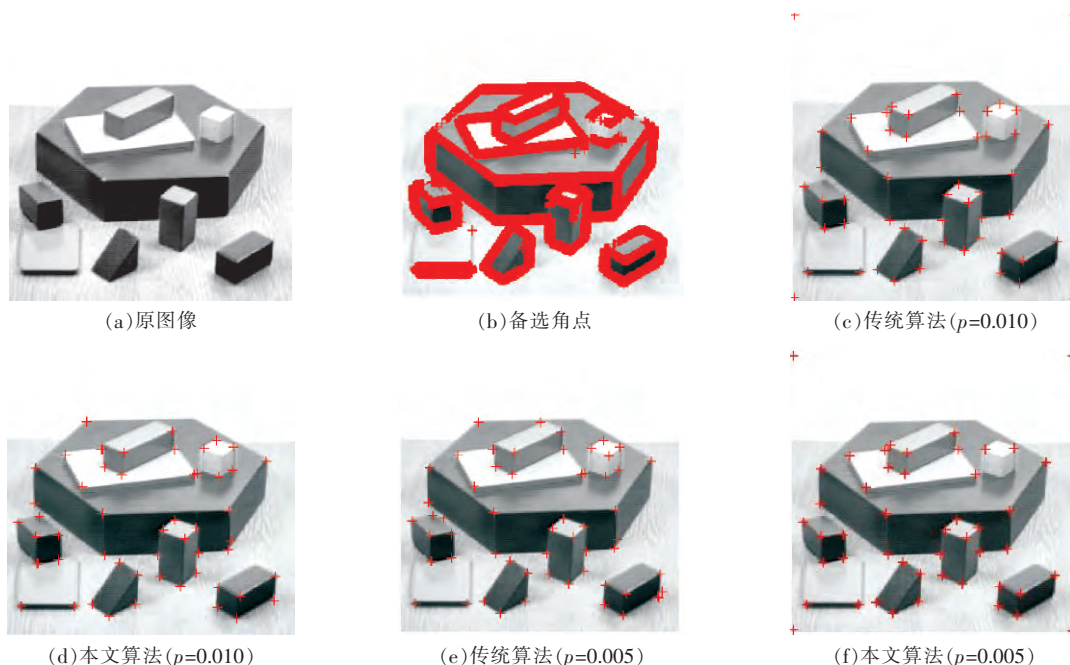


图1 实验结果对比

Fig. 1 Comparison of experimental results

### 2.3 剔除部分伪角点

在进行了角点的预筛选以及非极大值抑制之后,局部会有一些角点簇和伪角点出现,即在一定的领域内可能出现 2 个或者多个角点,这对于一些

后续处理可能导致不准确,比如图像匹配,角点簇可能导致匹配概率的明显增加,因此文中应该消除这种现象的出现,文中采用邻近角点的剔除,即在一定的局部范围内,只允许一个非极大值的出

现,当在局部范围内,出现 2 个或者以上的角点,选取非极大值最大的作为角点,排除其他的角点,文中采用  $5 \times 5$  的模板。

3 实验结果和分析

为了更好地验证文中算法的准确度,选择积木图像作为实验原图像(如图 1(a)所示)。参数

分别选取  $p = 0.010$   $p = 0.005$ ,半径  $R = 2$ ,将圆周窗口算法与传统算法进行对比实验,实验结果如图 1 所示。

3.1 算法时间和准确度对比

阈值选取为  $p \cdot Max$ ,将传统算法和文中算法进行比较,算法效率见表 1,算法准确度(正确角点数/(正确角点数 + 伪角点数 + 漏检角点数))见表 2。

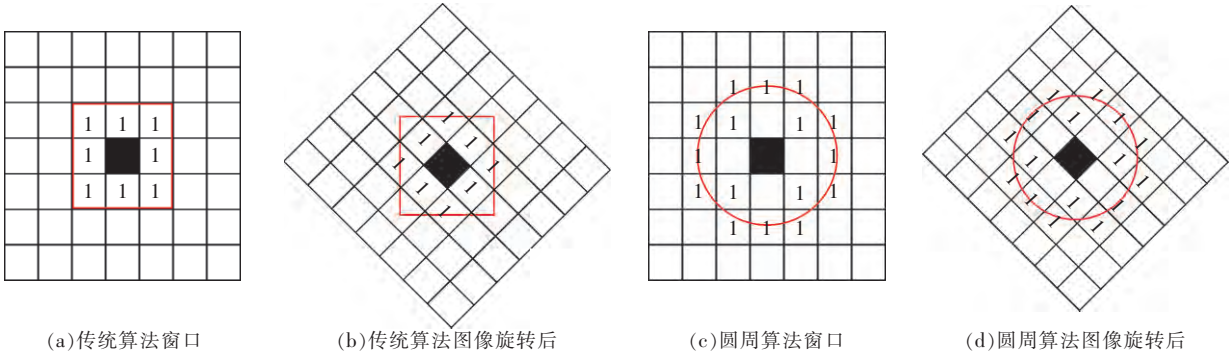


图 2 传统算法和圆周算法

Fig.2 Traditional and circumferential algorithms

由实验结果可知,原始 Harris 角点检测算法的漏检角点比较多,运行时间比较长,提出的圆周角点检测算法,漏检角点明显减少,以  $p = 0.010$  为例,准确度由传统算法的 61.19% 提高到 76.92%,且通过采用 Sobel 边缘检测角点备选方法,大大提高了算法的检测效率,平均时间从原来的 0.769 583 s 降低到 0.238 220 s,约为传统算法的

31%。

3.2 旋转不变性对比

将图 1(a) 图像旋转  $45^\circ$  角后作为实验图像,采用“错准比”((误检数 + 漏检数)/准确数)对文中圆周检测算法及传统算法进行结果比较,实验结果如图 3 所示,错准比比值越大,检测效果越差,见表 3。

表 1 算法运行时间(单位秒)对比结果

Table 1 Comparison of algorithm running time (in seconds)

检测算法	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	平均时间/s
传统算法	0.768 429	0.755 865	0.776 104	0.772 863	0.774 655	0.769 583
文中算法	0.244 733	0.231 752	0.236 831	0.238 437	0.239 346	0.238 220

表 2 算法精确度对比结果

Table 2 Algorithm accuracy comparison result

检测算法	正确角 点数/个	伪角 点数/个	漏检角 点数/个	准确度/%
传统算法( $p = 0.005$ )	45	7	15	67.16
文中算法( $p = 0.005$ )	50	9	10	72.46
传统算法( $p = 0.010$ )	41	7	19	61.19
文中算法( $p = 0.010$ )	50	5	10	76.92

由表 3 可知,对于旋转后图像,提出的圆周检测算法伪角点数得到了明显的减少,漏检角点也有所改善,因此文中算法的错准比明显低于传统算

法,尤其当  $p = 0.010$  时,错准比由传统算法的 45/22 下降至 30/22。由此可见,提出的圆周检测算法具有较强的旋转不变性。

表 3 实验对比结果(旋转  $45^\circ$ )

Table 3 Experimental comparison results (rotation  $45^\circ$ )

检测算法	正确角 点数/个	伪角 点数/个	漏检角 点数/个	错准比
传统算法( $p = 0.005$ )	35	7	25	32/35
文中算法( $p = 0.005$ )	34	2	26	28/34
传统算法( $p = 0.010$ )	22	7	38	45/22
文中算法( $p = 0.010$ )	22	2	28	30/22



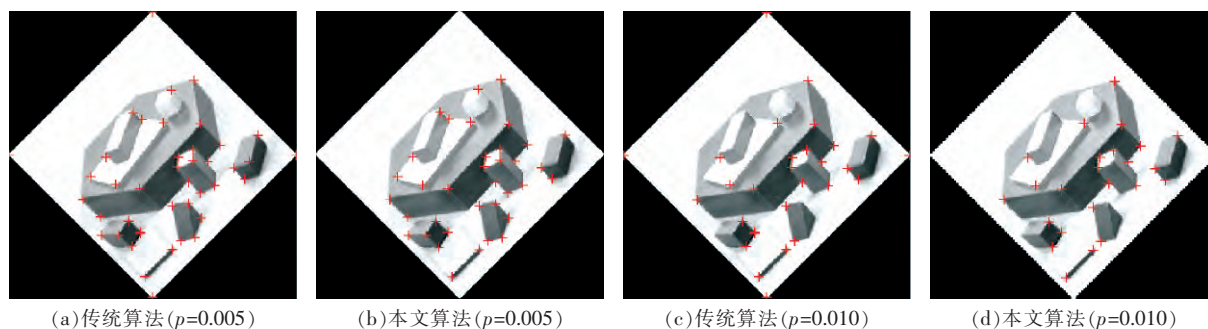


图3 旋转不变形实验对比

Fig. 3 Rotation without deformation experiment comparison

### 3.3 抗噪性对比

对原始图像加入  $\phi = 0$   $\delta = 0.005$  的高斯白噪声<sup>[20]</sup>, 对传统算法和文中算法进行试验对比。

如图4所示对比传统 Harris 角点检测算法, 文中算法大大改善了角点簇和伪角点的影响, 因此文中算法具有较强的抗噪性。

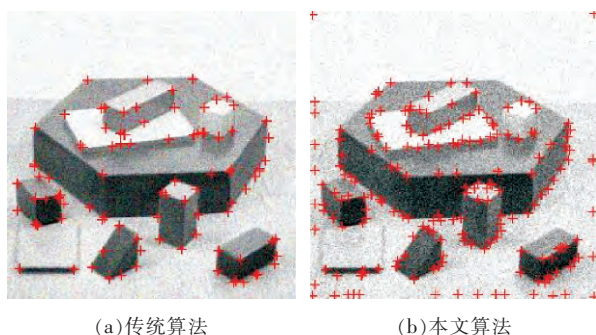


图4 加入噪音后实验对比

Fig. 4 Experimental comparison after adding noise

## 4 结 论

1) 实验结果表明文中改进算法相较于传统算法, 检测精度提高了约 10.52%, 检测效率提高了约 69.05%;

2) 提出的改进算法相较于传统算法, 具有旋转不变性及较强的抗噪性。由于本文算法阈值的选择仍为人工选取, 适用性与适应度不够高, 是未来研究的重点。

### 参考文献 (References):

- [1] 苏 婷, 金龙旭, 李国宁, 等. 基于改进 Harris 算法的图像角点检测[J]. 半导体光电, 2015, 36(3): 495 - 499.  
SU Ting, JIN Long-xu, LI Guo-ning, et al. Image corner detection based on improved Harris algorithm[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(3): 495 - 499.
- [2] CHEN Xiao-yuan. An algorithm for fast corner points extraction with reducing mistaken matching based on Harris operator[C]//Research Institute of Management Science and Industrial Engineering. Proceedings of 2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017). Research Institute of Management Science and Industrial Engineering, 2017: 6.
- [3] 毛雁明, 兰美辉, 王运琼, 等. 一种改进的基于 Harris 的角点检测方法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(5): 130 - 133.  
MAO Yan-ming, LAN Mei-hui, WANG Yun-qiong, et al. An improved corner detection method based on Harris[J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(5): 130 - 133.
- [4] 张 晶, 李玉龙, 王阳萍. 基于 B 样条函数的改进 Harris 角点检测算法[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(6): 32 - 35.  
ZHANG Jing, LI Yu-long, WANG Yang-ping. Improved Harris corner detection algorithm based on B-spline function[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013, 32(6): 32 - 35.
- [5] 龚 平, 刘相滨, 周 鹏. 一种改进的 Harris 角点检测算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(11): 173 - 175.  
GONG Ping, LIU Xiang-bin, ZHOU Peng. Improved Harris based corner detection algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(11): 173 - 175.
- [6] 邹志远, 安博文, 曹 芳, 等. 一种自适应红外图像角点检测算法[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1272 - 1276.  
ZOU Zhi-yuan, AN Bo-wen, CAO Fang, et al. Adaptive corner point detection of infrared images[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(10): 1272 - 1276.
- [7] 赵 萌, 温佩芝, 邓 星, 等. 一种参数自适应的 Harris 角点检测算法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2016,

- 36(3): 215–219.
- ZHAO Meng, WEN Pei-zhi, DENG Xing, et al. A parameter adaptive Harris corner detection algorithm [J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology 2016, 36(3): 215–219.
- [8] 张见双, 张红民, 罗永涛, 等. 一种改进的 Harris 角点检测的图像配准方法 [J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 230–233.
- ZHANG Jian-shuang, ZHANG Hong-min, LUO Yong-tao, et al. An improved Harris corner detection image registration method [J]. Laser & Infrared 2017, 47(2): 230–233.
- [9] JU Zeng-wei. Image segmentation based on adaptive threshold edge detection and mean shift [C]//IEEE, IEEE Beijing Section. Proceedings of 2013 IEEE 4th International Conference on Software Engineering and Service Science. IEEE, IEEE Beijing Section 2013: 4.
- [10] LI Zhong-hai. An adaptive threshold edge detection method based on the law of gravity [C]//Northeastern University, IEEE Singapore Industrial Electronics Branch, IEEE Control Systems Association Harbin Branch: Control and Decision Editorial Department, 2013: 4.
- [11] 沈德海, 张龙昌, 鄂旭. 基于 Sobel 算子的改进边缘检测算法 [J]. 信息技术, 2015(4): 15–18.
- SHEN De-hai, ZHANG Long-chang, E Xu. An improved edge detection algorithm based on Sobel operator [J]. Information Technology 2015(4): 15–18.
- [12] 张棋, 贾方秀, 殷婷婷. 基于改进 Sobel 算法的实时图像边缘检测系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2018(2): 101–104, 108.
- ZHANG Qi, JIA Fang-xiu, YIN Ting-ting. Design of real-time image edge detection system based on improved Sobel algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(2): 101–104, 108.
- [13] 龙忠杰, 王吉芳, 左云波. 一种改进的 Harris 与 SUSAN 相结合的角点检测算法 [J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(12): 133–136.
- LONG Zhong-jie, WANG Ji-fang, ZUO Yun-bo. An improved corner detection algorithm with the combination of Harris and SUSAN [J]. Computer Applications and Software 2013, 30(12): 133–136.
- [14] 卢伟家, 刘维军. 一种基于 Harris 特征点检测的改进算法 [J]. 仪表技术与传感器, 2017(12): 98–100, 104.
- LU Wei-jia, LIU Chan-lao. Improved algorithm based on Harris feature point detection [J]. Instrumentation Technology and Sensors 2017(12): 98–100, 104.
- [15] 王培元, 周建军, 王日胜, 等. 海面舰船目标检测优化算法仿真 [J]. 计算机仿真, 2017, 34(7): 416–421.
- WANG Pei-yuan, ZHOU Jian-jun, WANG Ri-sheng, et al. The simulations of an optimal algorithm for sea surface ship targets detection [J]. Computer Simulation, 2017, 34(7): 416–421.
- [16] 洪改艳, 芮廷先, 俞伟广, 等. Harris 角点检测的优化算法 [J]. 计算机系统应用, 2017, 26(4): 169–172.
- HONG Gai-Yan, RUI Ting-Xian, YU Wei-Guang, et al. Improved algorithm based on Harris corner detection [J]. Computer Systems & Applications 2017, 26(4): 169–172.
- [17] Jun Yan, Yan Piao. Research on the Harris algorithm of feature extraction for moving targets in the video [J]. Applied Mechanics and Materials 2014, 741: 378.
- [18] 赵万金, 龚声蓉, 刘纯平, 等. 一种自适应的 Harris 角点检测算法 [J]. 计算机工程, 2008(10): 212–214, 217.
- ZHAO Wan-jin, GONG Sheng-rong, LIU Chun-ping, et al. Adaptive Harris corner detection algorithm [J]. Computer Engineering 2008(10): 212–214, 217.
- [19] 周龙萍. 基于改进的 Harris 算法检测角点 [J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(2): 11–14.
- ZHOU Long-ping. Corners detection based on improved Harris algorithm [J]. Computer Technology and Development 2013, 23(2): 11–14.
- [20] LI Yi-bo, LI Jun-jun. Harris corner detection algorithm based on improved contourlet transform [J]. Procedia Engineering 2011, 15: 2239–2243.
- [21] 杨占龙. 基于特征点的图像配准与拼接技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- YANG Zhan-long. Research image registration and mosaic based on feature point [D]. Xi'an: Xidian University 2008.
- [22] 齐俊. 一种改进的 Harris 角点检测算法 [D]. 北京: 北京印刷学院, 2015.
- QI Jun. An improved Harris corner detection algorithm [D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication 2015.