

一种融合小波变化和精简 USAN 的 SUSAN 角点检测方法^{*}

滕 敏¹, 王长庚²

(1. 连云港职业技术学院信息工程学院 连云港, 222000)

(2. 中山大学广东省消防科学与智能应急技术重点实验室 广州, 510006)

摘要 针对传统的小吸收同值核区 (small univalue segment assimilating nucleus, 简称 SUSAN) 算法对建筑物进行形变检测, 存在计算量大、实时性较差和角点准确性低等问题, 提出了一种 SUSAN 改进算法。首先, 引入小波变化以及均值阈值计算, 提高算法的检测速度; 其次, 通过精简像素点集的筛选, 减少了检测时间; 最后, 对大楼建筑物进行了对比实验。结果表明, 所提出的改进算法在检测白化严重的照片时, 角点检测的正确率和检测率相比 SUSAN 算法提高了 21.24% 和 11.70%, 提升效果显著, 同时对其他类型建筑物的角点检测效果也有一定提升。

关键词 小吸收同值核区算法; 小波变化; 吸收同值核区; 均值阈值计算
中图分类号 TH70; TP29

引 言

目前, 检测建筑物形变的方法主要有基于全站仪技术的变形监测、基于全球定位系统的变形监测、三维激光扫描测量技术以及基于摄影测量技术的形变监测方法^[1]。本研究基于摄影测量技术的形变监测方法中的角点检测算法, 通过对实际场景摄影成像, 并进行角点检测来确定其形变大小。SUSAN 算法^[2]因其原理简单、检测效果好等优点, 成为常用的角点检测算法。

随着 SUSAN 算法的推广, 发现在实际建筑物形变检测中, 受拍摄角度、拍摄距离及光照噪声等影响, 无法保证每次拍摄的图像都在同一尺度。由于 SUSAN 算法只能在单一尺度下进行角点检测, 无法检测到尺度变化时的角点, 因此易丢失真实角点且伪角点数量增多。此外, 建筑物图像通常像素点数多, 这对快速角点检测提出了更高的要求, 需在保证检测真实角点的前提下减少其计算量, 提高响应速度和实时性, 而 SUSAN 算法需要对图像内的每一个像素点进行遍历计算, 算法繁琐且检测数据量大, 对快速性要求较高。

为了提高建筑物图像角点检测的准确性, 需要提高筛选角点时的阈值设置。SUSAN 算法在筛选角点时对核点所在的核值相似区进行阈值筛选, 其

阈值固定不变, 提取角点的准确度不高。当大楼建筑物发生微小形变时, 对角点的准确度要求较高。若检测出建筑物角点形变前后的误差较大, 则会对建筑物形变的真实情况造成误判。

针对 SUSAN 算法的不足, 郑昊等^[3]提高了算法的响应速度和准确率。钟金荣等^[4]提出一种双边几何阈值, 减少了伪角点的产生。侯明亮^[5]将原算法中的核值相似区替换为与核像素点邻接连通的区域, 减少了漏检和误检的情况, 提高了算法的准确性。文献[6-7]通过高斯核卷积, 克服了 SUSAN 算法的尺度单一性。文献[8-10]提高了算法的检测速度和实时性。文献[11-14]通过阈值逐级判定、灰度差阈值自适应取值、迭代运算和离散环形模板来改善算法的自适应图像能力。文献[15-19]通过精简吸收同值核区 (univalue segment assimilating nucleus, 简称 USAN) 的计算, 提高了算法的检测精度和准确度。

笔者提出一种改进的 SUSAN 算法, 通过引入小波变化, 在将建筑物图像分为高频区域和低频区域的基础上进行角点检测, 同时将圆形模板简化为 17 个像素以减少计算量。阈值均值计算解决了 SUSAN 算法由于拍照远近和光照差别造成的视角误差问题, 改善了算法的实时性。通过设置动态均值阈值, 提高了算法的检测精度以及对建筑物图像的形变检测效果, 为地震中的建筑物形变测量提供前

^{*} 国家重点研发计划资助项目 (2021YFC3001000)

收稿日期: 2023-02-07; 修回日期: 2023-09-14

期参考。同时,建立震前建筑物数据库,将实地拍摄的图像与其他算法进行角点检测对比实验。结果证明,笔者提出算法具有一定的优越性。

1 改进的小波变化和精简 USAN 计算的 SUSAN 算法

1.1 改进尺度单一性

在实际应用中对建筑物图像进行角点检测时,拍摄到的图像为单一尺度。在不同尺度下拍摄建筑物图像时,检测到的角点会存在差别。为了消除不同尺度下检测到的伪角点,需要避免拍摄角度、距离变化、光照以及噪声对检测角点的干扰。为了使提出的改进算法对尺度变化下的同一图像能够准确检测,笔者引入小波变化,将建筑物图像分为低频区域和高频区域,然后对低频区域进行小波分解,依此类推,得到多个尺度下的图像信息。图 1 为建筑物图像小波分解示意图。

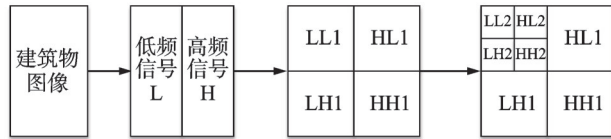


图 1 建筑物图像小波分解示意图

Fig.1 Schematic diagram of wavelet decomposition of a building image

笔者提出的改进算法采用 Mallat 算法,设 $v_j^2(j \in z)$ 为 $H^2(R)$ 空间上的一个可分离多尺度信息,得到图像二维变换的尺度函数以及各方向的小波函数,即

$$\begin{cases} \varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \\ \psi^H(x, y) = \varphi(x)\psi(y) \\ \psi^V(x, y) = \psi(x)\varphi(y) \\ \psi^D(x, y) = \psi(x)\psi(y) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\varphi(x, y)$ 为图像尺度分析函数; $\psi^H(x, y)$ 为小波函数 $\psi(x)$ 在水平方向的图像边缘信息; $\psi^V(x, y)$ 为小波函数 $\psi(x)$ 在垂直方向的图像边缘信息; $\psi^D(x, y)$ 为对角线方向的图像边缘信息。

小波分解后对不同尺度下的多幅图像进行 SUSAN 角点检测,得到候选角点集。

1.2 精简像素点筛选

笔者针对 SUSAN 算法计算量大、检测时间长的缺点进行改进。由于角点与整个圆形模板内的

像素点在灰度变化上差值很大,圆形模板对应的最外环同样如此,同时核值相似区对应的扇形面积与对应的弧长面积成正比,因此可以将圆形模板极限化为由待测像素点所在的圆形模板最外侧的 17 个像素点组成的圆环。将原算法中需检测圆形模板内的 37 个像素点简化为检测圆环内的 17 个像素点,大大减少了计算量。图 2 为圆形模板变为圆环模板示意图。

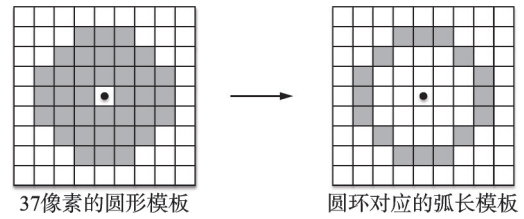


图 2 圆形模板变为圆环模板示意图

Fig.2 Schematic diagram of a circular template becoming a circular template

1.3 筛选阈值均值计算

针对 SUSAN 算法对不同建筑物图像进行角点检测时,需设置不同的阈值且图像自适应能力弱的问题,笔者提出了一种设置动态均值阈值的方法。其核心思想是将待测像素点与其邻域的 8 个像素点的灰度标准差作为筛选阈值 T ,当遍历图像像素点进行角点检测时,其筛选阈值也随之发生变化。 T 的计算式为

$$T = \sqrt{\sum_{(i,j) \in \text{circle}} (I(i,j) - g_t)^2 / 8} \quad (2)$$

其中: (i, j) 为圆形模板内像素点的坐标; $I(i, j)$ 为像素点的灰度值; $g_t = \sum_{(i,j) \in \text{circle}} I(i, j) / 8$ 。

1.4 算法评价指标设置

1.4.1 正确率

采用正确率来描述算法角点检测的准确性,即算法检测出来的真实角点数占检测角点总数的百分比。正确率 η 的计算式为

$$\eta = \frac{a}{b} \times 100\% \quad (3)$$

其中: a 为正确角点数; b 为检测角点总数。

1.4.2 可靠性

采用检测率 θ 来表示可靠性的大小。 θ 越大,表明该算法的可靠性越好; θ 越小,表明该算法的可靠性越差。当算法检测出的真实角点数在整个图像的真实角点总数中的比例越大时,认为该算法越可

靠。检测率 θ 的计算式为

$$\theta = \frac{a}{d} \times 100\% \quad (4)$$

其中: d 为待测图像的标注角点数。

1.4.3 高效性

笔者将每张大楼建筑物图像角点检测运行 N 次的平均时间作为角点检测所需时间,当所需时间越少,则说明该算法的运行速度更快,算法的高效性更好。具体计算式为

$$T = \sum_{i=1}^{30} T_i / N \quad (5)$$

其中: T_i 为角点检测算法运行第 i 次的时间; $i=1,2,\dots,N$ 。

2 实验结果与分析

2.1 5种算法实验结果

笔者将实地拍摄的具有代表性的大楼建筑物作为实验对象,根据建筑物图像的成像质量按顺序进行分类。在此基础上,将提出的改进算法与SUSAN算法、文献[3-5]算法进行角点检测对比实验。图3为5种算法角点检测实验结果。

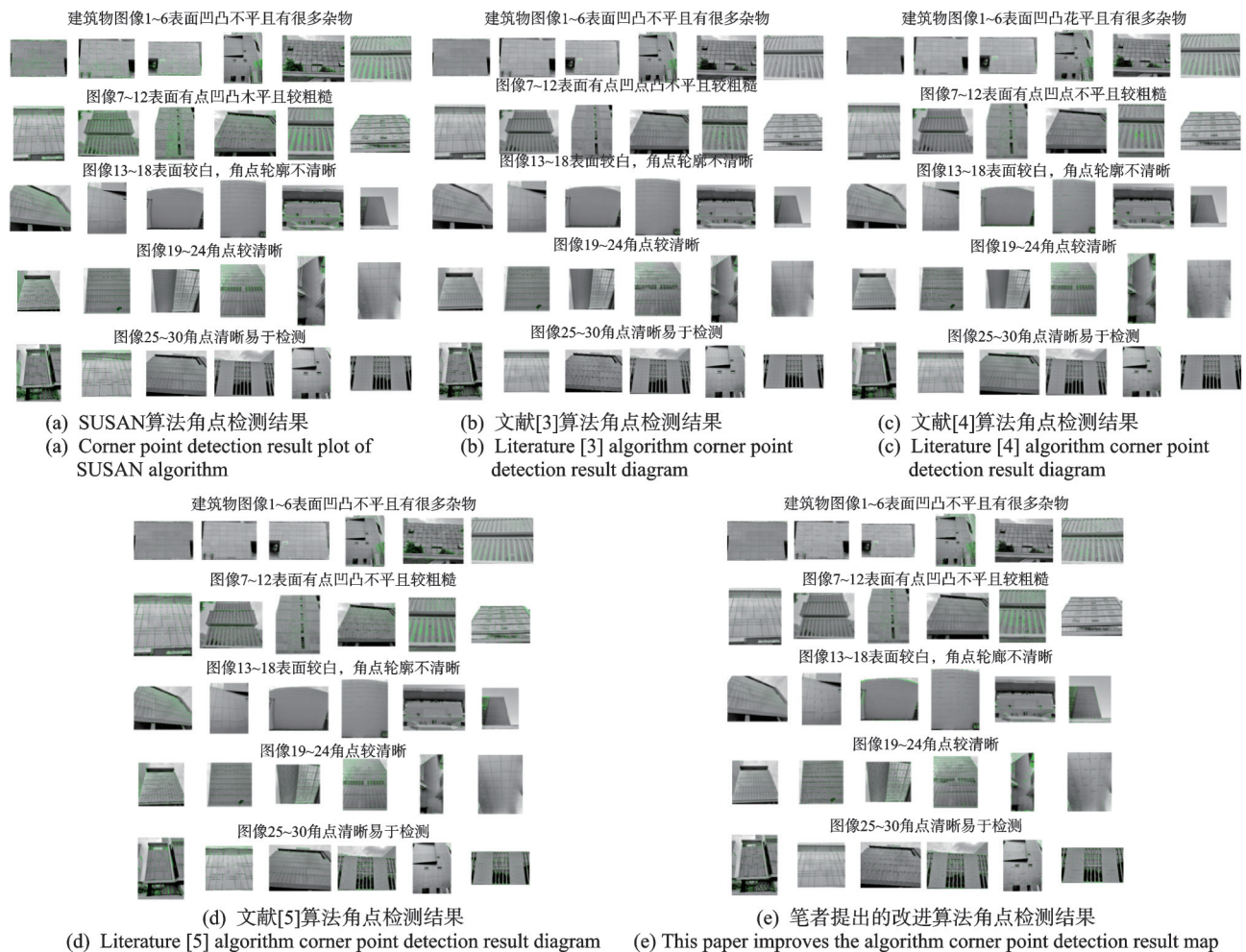


图3 5种算法角点检测实验结果

Fig.3 Comparison results of corner point detection experiments of 5 algorithms

2.2 5种算法实验数据比较

为了避免算法运行时各项指标的偶然误差发生和单一实验造成的随机误差,笔者将所有算法在相同硬件条件和外部环境下均运行 N 次,这里 $N=30$ 。为了最大限度地避免随机误差的产生,使实验数据更具有说服力,笔者对所有数据取其平均值。

2.2.1 准确性比较

采用5种算法对建筑物图像进行30次角点检测实验,得到5种算法的平均正确率,如表1所示。

图4为5种算法平均正确率箱型图。如图4所示,拍摄的建筑物图像1~6表面凹凸不平,建筑物表面有很多杂物,算法在检测建筑物图像时检测出很多伪角点,导致正确率下降。笔者提出的改进算

表 1 5 种算法的平均正确率

Tab.1 The average accuracy rate of the 5 algorithms %

次数	SUSAN 算法	文献[3] 算法	文献[4] 算法	文献[5] 算法	笔者改 进算法
1	1.69	21.04	23.57	31.19	31.92
2	2.11	23.84	25.47	33.85	28.69
3	3.87	17.96	19.25	30.04	24.17
4	6.23	8.27	9.04	8.02	10.23
5	7.82	30.50	33.52	39.13	33.50
6	8.62	38.36	44.67	39.94	60.22
7	9.38	19.72	25.81	51.79	29.08
8	12.27	61.67	78.72	74.68	90.83
9	12.99	42.53	50.74	51.11	58.04
10	13.47	38.79	49.21	44.96	57.82
11	14.00	25.78	49.16	38.00	40.81
12	16.65	31.84	45.83	60.89	52.28
13	17.68	38.66	58.27	57.12	69.47
14	19.87	44.00	43.06	53.45	53.97
15	20.60	22.27	20.82	44.19	18.05
16	21.50	29.15	31.78	51.79	32.75
17	23.75	29.30	35.90	45.51	38.89
18	24.59	33.16	34.56	38.61	42.32
19	25.19	41.17	62.07	77.46	68.27
20	29.35	45.17	50.06	69.28	60.28
21	30.43	61.43	62.87	84.55	66.67
22	31.66	42.33	37.75	58.35	51.26
23	33.23	49.49	45.67	46.15	49.07
24	34.23	65.35	64.95	78.48	83.54
25	35.29	44.39	48.66	57.09	51.26
26	40.67	44.36	59.23	87.35	64.27
27	45.64	54.79	59.73	44.98	68.79
28	51.37	59.10	74.43	73.25	66.22
29	55.78	66.78	68.82	78.21	79.35
30	56.51	67.05	89.13	87.15	74.56

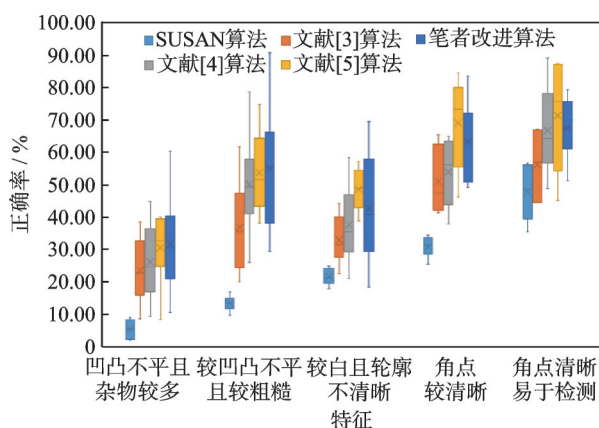


图 4 5 种算法平均正确率箱型图

Fig.4 Box plot of the average accuracy rate of 5 algorithms

法相比其他算法,正确率略微提高。图像 7~12 表面凹凸程度有所下降,建筑物表面相对平坦,5 种算法的正确率均得到提高。图像 13~18 检测到的角点数较少,正确率略微降低。图像 19~24 表面较为光滑,轮廓较清晰,图像质量较好,正确率进一步得到提高。图像 25~30 拍摄质量最好,角点特征最为明显,故正确率最高。在检测白化严重的建筑物 13~18 时,SUSAN 算法的平均正确率为 21.33%,文献[3-5]算法的正确率分别为 32.76%、37.40% 和 48.45%,笔者提出的改进算法的正确率为 42.58%。可见,提出的改进算法的正确率提高了近 21.24%,提升效果较为显著。

笔者采用正确率 η 来描述算法的准确性。SUSAN 算法的正确率最低,文献[3]算法通过将边缘检测和 SUSAN 算法相结合,在边缘轮廓的基础上进行角点检测,提升了角点检测的准确率。文献[4]算法通过将 SUSAN 算法中的单边阈值改为双边阈值,有效抑制了孤立噪声点和不感兴趣的角点。文献[5]算法通过将核同值相似区与核像素点邻接连通,有效减少了伪角点的产生。笔者提出的改进算法通过引入小波变化及自适应阈值设置,有效提高了角点检测的准确性。由表 1 可知,4 种算法相较于 SUSAN 算法在正确率上都有显著提高。对于建筑物表面凹凸不平的图像 1~6 和 7~12,笔者提出的改进算法的正确率与文献[5]算法的正确率相近。随着建筑物拍摄图片的质量变好,笔者提出的改进算法的正确率略微低于文献[5]算法,但优于文献[3]、[4]以及 SUSAN 算法。

2.2.2 可靠性比较

采用 5 种算法对建筑物图像进行 30 次角点检测实验,得到 5 种算法的平均检测率,如表 2 所示。

由表 2 可知,在检测白化严重的建筑物图像 13~18 时,SUSAN 算法的平均检测率为 49.79%,文献[3]、[4]和[5]算法的平均检测率分别为 34.95%、57.74% 和 55.74%,笔者改进算法的平均检测率为 61.49%,相比 SUSAN 算法提升了约 11.70%,提升效果最为显著。

图 5 为 5 种算法平均检测率箱型图。可以看出,5 种算法对建筑物图像 1~6、7~12、19~24 和 25~30 的检测率相差不大。文献[3]算法虽然提高了角点检测速度,但不可避免地会丢失图像内部的真实角点,导致检测率最低。图像 13~18 由于表面较白且轮廓较模糊,导致建筑物图像的角点较难检测出来,5 种算法的检测率都显著下降。SUSAN 算法的检测率最低,笔者改进算法的检测效果最好,在一定

表 2 5种算法的平均检测率

Tab.2 The average detection rate of the 5 algorithms %

次数	SUSAN 算法	文献[3] 算法	文献[4] 算法	文献[5] 算法	笔者改 进算法
1	84.72	64.44	97.22	95.83	94.44
2	90.00	72.86	97.14	95.71	97.14
3	88.46	69.74	92.31	94.87	93.59
4	75.93	59.80	94.44	92.59	96.30
5	73.72	58.83	88.32	94.16	95.62
6	87.85	63.55	89.02	86.21	91.59
7	86.17	69.15	93.62	96.81	94.68
8	84.45	47.22	84.11	87.35	89.68
9	62.81	51.14	79.63	77.31	85.19
10	90.04	73.71	93.23	94.82	95.02
11	70.60	57.39	82.92	87.32	91.02
12	85.76	62.19	89.07	92.05	91.06
13	87.80	58.90	91.41	92.27	95.02
14	86.11	57.82	89.26	91.67	94.44
15	30.77	24.36	42.31	36.54	46.15
16	46.94	39.18	83.67	73.47	76.53
17	39.97	24.13	28.59	25.75	32.49
18	7.14	5.29	11.19	14.76	24.29
19	83.94	58.20	90.44	95.79	95.03
20	89.39	67.88	92.86	88.10	94.59
21	84.70	67.61	86.57	93.28	95.52
22	85.36	69.82	89.46	92.14	94.46
23	58.06	31.94	70.97	79.03	84.95
24	75.00	51.18	92.65	97.06	97.06
25	82.65	64.18	92.86	90.82	93.37
26	88.17	67.35	94.27	88.55	95.42
27	84.98	54.59	92.23	88.87	93.46
28	87.89	55.23	88.67	92.58	97.27
29	79.72	57.55	90.57	89.15	92.45
30	87.62	51.76	93.49	94.79	96.42

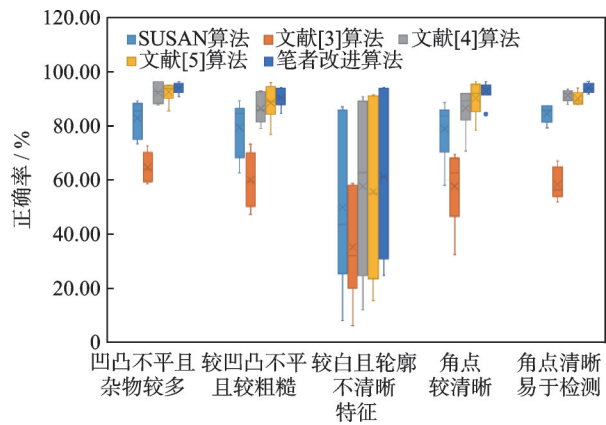


图 5 5种算法平均检测率箱型图

Fig.5 Box plot of the average detection rate of 5 algorithms

程度上提升了对建筑物角点的检测能力。

笔者采用检测率来表示可靠性的大小,由于SUSAN算法需对图像中的每个像素点都进行USAN区域判定,并通过阈值和非极大值抑制的筛选,不容易丢失角点,因此SUSAN算法的可靠性相对较好。由表2可知,除文献[3]算法外,其他算法的检测率都比SUSAN算法高,故文献[3]算法的可靠性较低,笔者提出的改进算法在可靠性上更有优势。

2.2.3 高效性对比

对数据库图像进行30次角点检测实验,得到5种算法的平均检测时间,如表3所示。

5种算法平均检测时间箱型图如图6所示。

表 3 5种算法的平均检测时间

Tab.3 The average detection time of the 5 algorithms s

次数	SUSAN 算法	文献[3] 算法	文献[4] 算法	文献[5] 算法	笔者改 进算法
1	1.178 8	0.315 2	1.222 0	1.215 3	0.818 1
2	0.810 1	0.308 8	0.900 2	0.808 3	0.562 9
3	1.105 7	0.326 9	1.129 8	1.254 7	0.719 4
4	1.482 6	0.367 9	1.506 1	1.526 3	0.999 2
5	1.318 3	0.348 9	1.365 0	1.297 8	0.943 0
6	2.626 4	0.329 1	2.686 3	2.631 2	1.836 2
7	1.217 0	0.355 6	1.311 1	1.227 0	0.833 0
8	1.308 6	0.345 5	1.358 8	1.287 6	0.962 4
9	1.382 5	0.328 6	1.457 8	1.375 9	0.971 4
10	1.337 8	0.361 8	1.371 5	1.301 0	0.961 7
11	2.346 2	0.332 2	2.510 8	2.354 4	1.677 6
12	1.152 6	0.360 5	1.179 4	1.132 7	0.849 6
13	1.326 3	0.352 5	1.354 2	1.331 2	0.965 0
14	0.748 9	0.344 4	0.776 7	0.751 9	0.510 9
15	0.656 2	0.302 8	0.722 2	0.686 4	0.458 0
16	0.712 5	0.305 1	0.749 0	0.691 3	0.486 6
17	1.307 9	0.324 3	1.361 1	1.321 6	0.958 5
18	0.516 6	0.293 9	0.547 6	0.523 5	0.364 7
19	1.070 1	0.343 0	1.121 0	1.096 8	0.786 2
20	1.609 0	0.343 0	1.812 2	1.667 2	1.153 0
21	0.931 0	0.335 3	0.961 0	0.971 1	0.657 9
22	1.909 1	0.366 0	1.967 8	1.886 4	1.400 1
23	0.755 9	0.321 7	0.798 0	0.727 8	0.515 3
24	0.687 0	0.293 1	0.741 7	0.657 1	0.476 9
25	1.376 1	0.334 9	1.420 3	1.378 2	1.025 8
26	1.065 7	0.346 7	1.109 2	1.058 5	0.778 8
27	1.591 4	0.360 4	1.654 0	1.560 4	1.147 3
28	1.016 4	0.319 3	1.038 2	1.041 2	0.708 7
29	0.881 8	0.321 6	0.907 8	0.900 7	0.574 3
30	0.934 0	0.309 1	0.938 9	0.962 5	0.650 7

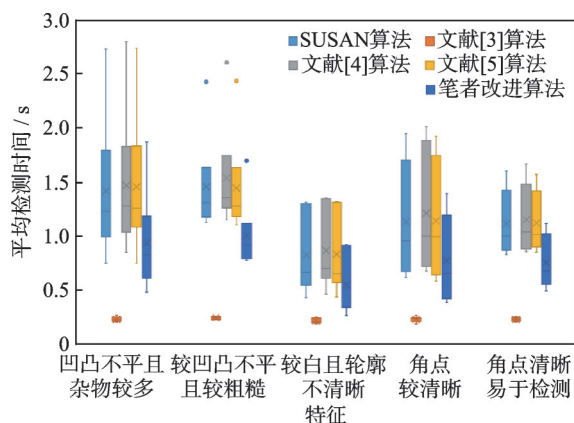


图 6 5 种算法平均检测时间箱型图

Fig.6 Average detection time bins of 5 algorithms

由表 3 和图 6 可知:①文献[3]算法的检测时间最短,由于边缘轮廓的像素点数量远小于图像像素点数量,故文献[3]算法的高效性明显提高;②文献[4]算法通过双边阈值来改善角点检测的准确性,没有涉及到提高角点检测速度,比 SUSAN 算法增加了 1 次下限阈值比较的计算量,故运行时间略大于 SUSAN 算法;③文献[5]算法由于没有涉及提升算法响应速度,故检测时间与 SUSAN 算法相差不大;④笔者提出的改进算法通过将 USAN 定义中的 37 像素圆形模板优化为 17 像素圆环模板,减少了其计算量,明显提升了角点检测速度和时间,因此平均检测时间最短、响应速度最快。

5 种算法平均指标值如表 4 所示。图 7 为 5 种算法平均指标值柱状图。

表 4 5 种算法平均指标值

Tab.4 Average index values of the 5 algorithms

算法	平均 正确率/%	平均 检测率/%	平均 检测时间/s
SUSAN 算法	23.55	75.56	1.212 1
文献[3]算法	39.94	55.23	0.333 3
文献[4]算法	46.76	83.42	1.266 0
文献[5]算法	54.55	83.99	1.220 9
笔者改进算法	51.89	87.14	0.858 4

从表 4 和图 7 可知:①SUSAN 算法对建筑物图像角点检测的正确率最低,其他 4 种算法均提高了算法的正确率;②笔者改进算法在针对白化严重的建筑物检测时检测效果最好,针对其他类型的建筑物图像检测时,检测效果同样得到了一定提升;③文献[3]算法对图像的边缘轮廓进行角点检测,虽然减少了检测时间,但丢失了部分图像内部的真实角点,导致检测率大大降低;④文献[4]算法在原算法的基

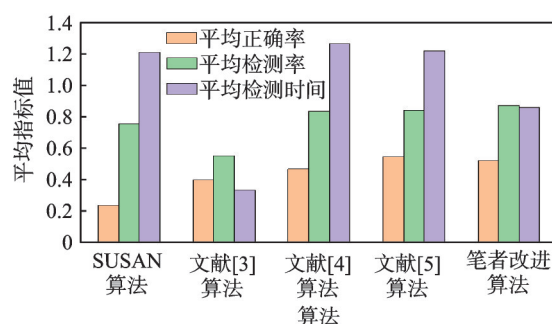


图 7 5 种算法平均指标值柱状图

Fig.7 The histogram of the average indicator values of the 5 algorithms

础上增加双边阈值进行角点筛选,在小幅增加算法计算量的基础上改善了算法的准确性,但没有提高算法的检测速度;⑤文献[5]算法减少了原算法漏检和误检现象,提高了算法的准确性,但对算法的检测时间提升不大;⑥笔者改进算法通过小波变化,对得到多尺度下的建筑物图像进行角点检测和均值阈值设置,提高了算法的准确性,通过改进圆环模板精简像素点集的筛选,提高了算法的检测速度和实时性。

3 结束语

针对传统 SUSAN 算法存在建筑物角点检测计算量大、实时性较差和角点准确性低等问题,通过引入小波变化来提升算法尺度的多样性。将 USAN 定义中的 37 像素圆形模板改为 17 像素的圆环模板,以减少其计算量,通过提高响应速度和设置均值阈值来提高角点检测的准确性及自适应能力。分别运用笔者改进算法、SUSAN 算法和其他 3 种文献算法,对建筑物图像进行 30 次角点检测实验,并将实验数据取平均值进行比较。根据实验结果可知,笔者改进算法的检测效果最好,角点检测速度和准确性均得到一定提升,能够更好地建立地震前建筑物角点检测数据库。

参 考 文 献

- [1] 包欢. 大型建筑物实时形变监测系统理论及应用研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2009.
- [2] 刘开放,刘彦辉,徐丽,等. 塌落振动作用下建筑结构动力响应研究及评估[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(4): 695-702.
LIU Kaifang, LIU Yanhui, XU Li, et al. Study and evaluation of dynamic response of building structure under collapse vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(4): 695-702. (in Chinese)

- [3] 郑昊, 林玉娥. 一种改进的 SUSAN 角点检测算法[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(22): 40-42.
ZHENG Hao, LIN Yu'e. An improved SUSAN corner point detection algorithm[J]. Computer Knowledge and Technology, 2020, 16(22): 40-42. (in Chinese)
- [4] 钟金荣, 顾夏华, 林嘉宇. 双边几何阈值 SUSAN 角点提取算法[J]. 微处理机, 2010, 31(5): 71-73.
ZHONG Jinrong, GU Xiahua, LIN Jiayu. SUSAN corner detection algorithm with double geometry threshold[J]. Microprocessors, 2010, 31(5): 71-73. (in Chinese)
- [5] 侯明亮. SUSAN 角点检测算法稳定性改进研究[J]. 计算机与现代化, 2010(10): 75-77, 80.
HOU Mingliang. Research on improving stability of SUSAN corner detection algorithm[J]. Computer and Modernization, 2010(10): 75-77, 80. (in Chinese)
- [6] 吕冀, 汪渤, 高洪民. 快速 Laplace-SUSAN 角点算法[J]. 光学技术, 2008, 34(6): 873-876.
LÜ Ji, WANG Bo, GAO Hongmin. A fast Laplace-SUSAN corner detector[J]. Optical Technique, 2008, 34(6): 873-876. (in Chinese)
- [7] 何书勇, 刘庆宽, 张同亿, 等. 干扰下方形超高层建筑风压的非高斯特性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(2): 249-255.
HE Shuyong, LIU Qingkuan, ZHANG Tongyi, et al. Non-Gaussian feature of wind pressure on square super high-rise buildings under disturbance[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(2): 249-255. (in Chinese)
- [8] 林鹏岳, 李玲玲, 李翠华. 一种改进的快速 SUSAN 角点检测算法[J]. 计算机与现代化, 2010(2): 66-68.
LIN Pengyue, LI Lingling, LI Cuihua. Improved algorithm based on SUSAN corner detection[J]. Computer and Modernization, 2010(2): 66-68. (in Chinese)
- [9] HE L Y, ZHOU X Y. An auto-adaptive threshold pre-detection SUSAN corner detection algorithm[C]//2013 5th International Conference on Intelligent Human-machine Systems & Cybernetics. Hangzhou, China: IEEE Computer Society, 2013:511-514.
- [10] ZHANG W C, SUN C M. Corner detection using second-order generalized Gaussian directional derivative[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(4):1213-1224.
- [11] YIN D, ZHAO Y, WANG B, et al. Improved corner detection algorithm based on SUSAN principle[J]. The International Society for Optical Engineering, 2007, 6623(10): 188-190.
- [12] YANG X F, HUANG Y M, YAN L. An improved SUSAN corner detection algorithm based on adaptive threshold [C] //2010 2nd International Conference on Signal Processing System. Dalian, China: IEEE, 2010:613-616.
- [13] XU C, LEI L, SONG J, et al. Corner detection and matching for infrared image based on double ring mask and adaptive SUSAN algorithm[J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(4): 194.
- [14] 韩玉迎, 王晨, 杜金香, 等. 基于图像边缘识别的面内振动位移测试方法[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(3): 470-475.
HAN Yuying, WANG Chen, DU Jinxiang, et al. In-plane vibration measurement technique based on image edge recognition method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3): 470-475. (in Chinese)
- [15] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection [DB/OL]. arXiv. 2004.10934. (2020-05-23) [2022-12-15]: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.
- [16] HAN S Q, YU W B, YANG H T, et al. An improved corner detection algorithm based on Harris [C] //2018 Chinese Automation Congress (CAC). Xi'an, China: IEEE, 2018: 1575-1580.
- [17] YAN M Q, ZHANG B L, GUO M, et al. An improved corner detection algorithm for image sequence [C] // International Symposium on Optoelectronic Technology and Application: Image Processing and Pattern Recognition. Beijing, China: SPIE, 2014: 93010J.
- [18] 夏海英, 刘伟涛, 朱勇建. 一种改进的快速 SUSAN 棋盘格角点检测算法[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(1): 44-52.
XIA Haiying, LIU Weitao, ZHU Yongjian. An improved fast SUSAN chessboard corner detection algorithm[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(1): 44-52. (in Chinese)
- [19] 刘景良, 郑锦仰, 郑文婷, 等. 基于改进同步挤压小波变化识别信号瞬时频率[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 814-821.
LIU Jingliang, ZHENG Jinyang, ZHENG Wenting, et al. Instantaneous frequency identification of signals based on improved synchro squeezing wavelet transform [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 814-821. (in Chinese)



第一作者简介:滕敏,女,1973年12月生,硕士、副教授。主要研究方向为计算机应用技术、软件技术及大数据。
E-mail:tengmin_lyg@163.com