

一种快速鲁棒的 LOG-FAST 角点算法

梁艳菊^{1,2} 李庆^{1,2} 陈大鹏¹ 颜学究²

(中国科学院微电子研究所 北京 100029)¹ (中国科学院微电子所昆山感知中心 昆山 215347)²

摘要 基于高时间效率的 FAST 算法,提出了一种快速鲁棒的 FAST-LOG 角点算法。使用直方图均衡化方法对图像进行增强,提高图像成分的清晰度并消除图像中光照强度的影响;运用拉普拉斯-高斯函数对图像进行卷积,实现图像的高斯平滑和增强边缘,及对噪声最大化的抑制;最后使用 FAST 算子检测角点。对比实验证明,新算子对于添加高斯噪声的分辨率为 640×480 的图像,其检测时间可达到 0.05s;对光照不同的图像具有相近的检测性能;角点重复率可达 98%。该算子可应用于实时视频图像的处理,为开发基于视觉的实时智能车辆预警系统提供了新的研究思路。

关键词 拉普拉斯-高斯,FAST,快速,角点检测,图像增强

中图分类号 U495 **文献标识码** A

Fast and Robust LOG-FAST Corner Algorithm

LIANG Yan-ju^{1,2} LI Qing^{1,2} CHEN Da-peng¹ YAN Xue-jiu²

(Institute of Microelectronics, China Academy of Sciences (IMECAS), Beijing 100029, China)¹

(Smart Center in Kunshan of IMECAS, Kunshan Industrial Technology Research Institute, Kunshan 215347, China)²

Abstract Based on time-efficient FAST algorithm, the paper described a fast and robust LOG-FAST corner algorithm. Histogram equalization as one kind of image enhancement was firstly applied to the original image for sharpening useful image information and improving image illumination invariance. Then Laplacian of Gaussian operator was convoluted to achieve image gaussian smooth and edge enhancement, and also suppress noise in the maximal degree. At last, FAST algorithm was applied to produce LOG-FAST corners. The new corner detection algorithm not only features with time-efficient as FAST algorithm, also has illumination invariant, noise invariant and robust feature. Experiments show that LOG-FAST algorithm can achieve a detection time 0.05s on noised images sized with 640×480 . It has the similar detection performance on illuminate variant images and has repeatability 98 percent. Due to its excellent performance, LOG-FAST algorithm can be used in real time video process applications such as intelligent vehicle warning system.

Keywords Laplacian of gaussian, FAST, Robust, Corner detection, Image enhancement

1 引言

在智能车载终端中,基于视觉的主动安全往往需要对实时视频进行处理,识别前方车辆,实现主动报警。角点检测是目标识别跟踪、图像配准等任务的基础,是研究基于视觉的智能车辆主动安全的重要部分。角点是图像上具有可区分性、位置不变性和特征稳定性较好的点的集合^[1]。如果角点对光照变化、尺度变化、透视变换和噪声具有较强的鲁棒性和可重复性,并且具有较高的时间效率,则具有更高的实用价值。

目前应用较为广泛的角点算子有 Harris^[2]、SUSAN^[3]、SIFT^[4,5]、SURF^[6]等。其中,SIFT 算法是一种鲁棒性好,具有尺度不变性的角点检测方法,但 SIFT 计算数据量大、时间复杂度高。SURF 算法较之 SIFT 在计算速度和鲁棒性上有

较大改进,但仍然无法满足实时性要求较高的场合。Edward Rosten 和 Tom Drummond 提出了一种启发式的、简单快速的角点探测算法 FAST (Features from Accelerated Segment Test),该算法检测速度快,可应用于实时视频处理^[7],但其旋转不变性差,光照不变性差,鲁棒性差。

为提高角点算子的光照不变性和鲁棒性,在角点检测中,采用图像增强技术对图像进行预处理。图像增强能够增强图像中用户感兴趣的信息,其主要目的有两个:一是改善图像的视觉效果,提高图像成分的清晰度;二是使图像变得更有利于计算机处理。对光照强度差、对比度比较大的图像进行图像增强后,图像特征点的分布更加均匀、稳定。

为提高角点算子的抗噪声能力,可对图像进行滤波处理。考虑应用中普遍存在的高斯噪声,使用二维高斯滤波函数实

到稿日期:2011-08-01 返修日期:2011-12-23 本文受中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YW-148),中国科学院知识创新工程重要方向项目:车联网智能服务应用系统及示范资助。

梁艳菊(1985-),女,博士生,主要研究方向为图像处理、目标识别,E-mail:liangyanju@ime.ac.cn;李庆(1972-),男,博士,副研究员,主要研究方向为多传感器集成与数据融合、数字图像处理;陈大鹏(1968-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为集成电路、MEMS;颜学究(1985-),男,硕士生,主要研究方向为图像视频压缩。

现对噪声最大程度的抑制。图像经高斯滤波后,其边界、轮廓被模糊化,因此需要图像锐化来补偿图像的轮廓,增强图像的边缘及灰度跳变的部分,使图像变得清晰,易于检测特征点。图像锐化中,普遍使用拉普拉斯算子。拉普拉斯算子是线性二次微分算子,具有各向同性和位移不变性。高斯滤波函数和拉普拉斯锐化算子卷积组成拉普拉斯-高斯算子^[8-10],尺度标准化的拉普拉斯-高斯函数能够形成稳定的特征区域,其形成的边缘和兴趣点具有比较高的稳定性,性能优于梯度、Hessian 矩阵和 Harris 角点函数^[11]。

经图像增强和拉普拉斯算子滤波处理后,再进行 FAST 算子提取,可提高 FAST 算子的光照不变性和鲁棒性,形成较为稳定的角点。文章基于 FAST 算法,结合图像增强技术和拉普拉斯-高斯(LOG, Laplacian of Gaussian)算子,提出了一种 LOG-FAST 角点检测算子。LOG-FAST 角点提取流程是:首先采用直方图均衡化的图像增强技术提高图像成分的清晰度,消除光照强度的影响;然后使用拉普拉斯-高斯算子对图像进行滤波处理,以消除图像增强引入的噪声和图像采集时产生的噪声;最后采用 FAST 算子提取图像角点,以保证算子的时间效率。算子的各个流程在接下来的篇幅中进行详细介绍。第 2 节介绍直方图均衡化的图像增强;第 3 节介绍拉普拉斯-高斯算子;第 4 节介绍 FAST 角点算子;第 5 节对 LOG-FAST 算子进行实验验证。

2 图像增强

图像增强空域法中最常用、最重要的算法之一就是直方图均衡化^[12]算法。直方图均衡化借助直方图变换实现灰度映射从而达到图像增强的目的。其基本思想是把原图像的直方图变换成为均匀分布的形式,这样就增加了像素灰度值的动态范围,从而达到增强图像整体对比度的效果。

在角点检测中,进行直方图均衡化的目的是保证每个灰度级的概率密度相等。对那些对比度比较大的图像,先对其进行直方图均衡化,再进行特征点检测,使得特征点分布的更加均匀。

对离散数字图像 $\{x\}$, 灰度为 i 的像素的出现概率为:

$$p_x(i) = \frac{n_i}{n}, 0 \leq i < L \quad (1)$$

式中, n_i 表示灰度 i 出现的次数, L 是图像中所有的灰度数, n 是图像中所有的像素数, $p_x(i)$ 实际上是像素为 i 的图像直方图, 归一化到 $0 \sim 1$ 。

定义 1 p_x 的累计概率函数 (cumulative distribution function) 表示为:

$$cdf(i) = \sum_{j=0}^i p_x(j) \quad (2)$$

创建一个形式为 $y = T(x)$ 的变化形成一个新的图像 $\{y\}$, 使得 y 的累计概率函数可以在所有值范围内进行线性变化, 即为:

$$cdf_y(i) = iK \quad (3)$$

转换公式定义为:

$$y = T(x) = cdf_x(i) \quad (4)$$

式中, T 将不同的灰度等级映射到 $0 \sim 1$ 域, 为了将这些值映射回它们最初的域, 需要在结果上应用下面的简单变换:

$$y_i' = y_i \cdot (\max\{x\} - \min\{x\}) + \min\{x\} \quad (5)$$

直方图均衡化对图像的增强作用如图 1 所示, 左图表示

原图片, 图 1 右图为增强后的图片。



图 1 直方图均衡化效果图

3 拉普拉斯-高斯 (LOG) 算子

拉普拉斯-高斯算子源于 Marr 视觉理论^[13]中提出的边缘提取思想, LOG-FAST 角点算子利用拉普拉斯-高斯算子对原始图像进行最佳的平滑处理, 以实现噪声最大程度的抑制, 再对平滑后的图像进行锐化, 以加强图像边缘和灰度变化剧烈的部分^[8,9]。

高斯滤波器是一种线性滤波器, 可实现对高斯噪声的抑制。高斯滤波器可表示为:

$$G_\sigma(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

利用高斯滤波器对图像进行高斯滤波可表示为高斯滤波器与图像的卷积。

拉普拉斯-高斯算子通过对高斯滤波器求取拉氏变换得到:

$$LoG \triangleq \Delta G_\sigma(x, y) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} G_\sigma(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} G_\sigma(x, y) \quad (7)$$

根据卷积和 Δ 算子的性质如式 (8) 所示, 先计算拉普拉斯-高斯算子 $\Delta G_\sigma(x, y)$, 再与图像进行卷积运算。

$$\begin{aligned} \Delta[G_\sigma(x, y) * f(x, y)] &= [\Delta G_\sigma(x, y)] * f(x, y) \\ &= LoG * f(x, y) \end{aligned} \quad (8)$$

利用式 (9) 一式 (11) 来计算拉普拉斯-高斯算子, 在计算中, 为表示方便, 忽略归一化因子 $1/\sqrt{2\pi\sigma^2}$ 。

$$\frac{d}{dx} G_\sigma(x, y) = \frac{d}{dx} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} = -\frac{x}{\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} G_\sigma(x, y) &= \frac{x^2}{\sigma^4} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} - \frac{1}{\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \\ &= \frac{x^2 - \sigma^2}{\sigma^4} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} G_\sigma(x, y) = \frac{y^2 - \sigma^2}{\sigma^4} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (11)$$

拉普拉斯-高斯算子最后可表示为:

$$\begin{aligned} LoG \triangleq \Delta G_\sigma(x, y) &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} G_\sigma(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} G_\sigma(x, y) \\ &= \frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \end{aligned} \quad (12)$$

当 $\sigma=1$ 时, 高斯滤波器和拉普拉斯-高斯滤波函数如图 2 所示。

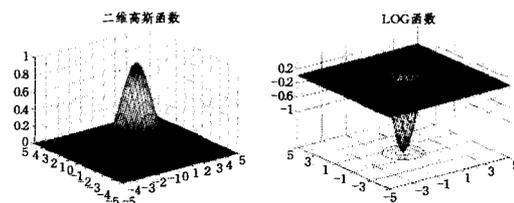


图 2 高斯 (左) 与拉普拉斯-高斯滤波函数 (右)

4 FAST 算子

Edward Rosten 和 Tom Drummond 基于启发式的解决思路,提出了简单快速的 FAST 角点探测算法^[7,14]。当某个像素点的周围邻域内有足够多的像素点与该点处于不同的灰度区域时,该点被确认为一个 FAST 角点。将其应用到灰度图像中,FAST 角点的周围有足够多的像素点的灰度值大于该点的灰度值或小于该点的灰度值。

进行 FAST 角点检测时,首先选择图像中任意一个像素点和以它为中心的一个区域,通常选择圆形区域,如图 3 所示。该圆形区域为一个半径等于 3 的离散化的 Bresenham 圆,最外围的像素点按顺时针顺序依次编号为 1—16。

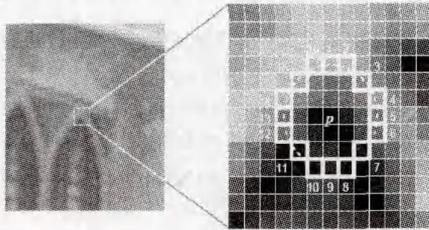


图 3 FAST 角点检测模板

中心点 P 是否为角点取决于其周围编号为 1—16 的像素值。假设 16 个像素值中有连续的 n 个像素值满足式(13),则 P 点被认为是角点。其中 I_x 表示连续的 n 个像素点的灰度值, I_p 表示 P 点的灰度值, t 为一个设定的阈值常数。

$$|I_x - I_p| > t \quad (13)$$

为实现快速计算,一般选择 $n=12$ 。角点检测可简化为检测像素编号为 1,9,5,13 的 4 个像素点,因为在该 4 个像素点中,有 3 个均满足式(13),才可能被确认为角点。如此就可以快速排除整幅图像中的很多像素点,提高角点检测的时间效率。

5 实验结果及分析

在实时的基于视觉的智能车载系统主动安全的应用场合,角点算子应该具有以下优点:

1. 时间复杂度低。能够为目标识别与定位、图像配准等留下足够的时间余地以满足实时性视频的处理要求。
2. 具有光照不变性。在实际车辆运行中,由于天气、建筑物、高树遮挡等因素,图像的光照强度存在很大的差异。良好的角点算子应该在不同的光照强度下产生大致相同的角点数目和位置相似的角点。
4. 抗噪声能力强,鲁棒性好。因为实际车辆行驶环境及拍摄设备的限制,噪声的存在不可避免。角点算子应该具有良好的抗噪声能力,在不同视角的图像中提取的角点所对应的世界坐标应大致相同。

基于上述特点,文中对 LOG-FAST 算法进行了实验验证。采用国际通用的牛津大学 Visual Geometry Group 提供的测试图片组及 Edward Rosten 等提供的图片对算法进行测试。测试图片的大小归一化为 640×480 。为测试算子的抗噪声能力,对图像加上了随机高斯噪声。对加了高斯噪声后的图像,采用不同的角点如 SIFT、SURF、FAST、LOG-FAST 检测算子来检测角点,测试结果如表 1 所列。图 4 示出了 FAST 算子(左)与 LOG-FAST 算子(右)的角点检测效果。表中列出了几种角点算子对两幅图像的检测时间和角点数

目。可以看出,LOG-FAST 算子在光照不变性、抗噪声能力、时间复杂度方面均优于其他算子,特别是检测时间,约为 SIFT 算子的 7%。



图 4 FAST 算法(左)与 LOG-FAST 算法检测效果图(右)

表 1 角点检测耗时比较

| | Time cost | Corner number | Time cost | Corner number |
|----------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| | Img1 | Img1 | Img2 | Img2 |
| SIFT | 0.654s | 287 | 0.868s | 429 |
| SURF | 0.256s | 287 | 0.363s | 429 |
| FAST | 0.046s | 455 | 0.074s | 496 |
| LOG-FAST | 0.048s | 496 | 0.050s | 496 |

引用角点重复率作为检测角点鲁棒性的评判标准。根据 Edward Rosten 的观点,角点重复率表示在不同图像中角点所对应的实际物理坐标是否一致。对于两幅从不同视角拍摄的图像,在 LOG-FAST 算法检测到的角点集合中,检测可用角点和重复角点。可用角点和重复角点的判定标准为:当一个角点出现在第一幅图像中,并极有可能出现第二幅图像中,该角点被标识为可用点;当一个角点不但满足可用点的标准,并且对应的实际物理位置与第一幅图像一致时,被认为是重复角点。角点的重复率 R 定义为

$$R = \frac{N_{repeated}}{N_{useful}} \quad (14)$$

测试采用图 5 所示的图片组,并将其分为两两组对,共组成 5 对图像:图片 1 和图片 2,图片 1 和图片 3,以此类推到图片 1 和图片 6。对每对图像进行 LOG-FAST 角点检测,再标识出可用点和重复点,然后按照式(14)计算出点重复率。

重复点的判定准则是:对角点进行 KNN (k -Nearest-Neighbor)^[15] 最近邻角点匹配,若一幅图像中的角点能够在另一幅图像中找到匹配点,则认为该点为重复角点。对图片 1 和图片 6 进行 KNN 的配准效果如图 6 所示。角点重复率的测试结果如图 7 所示。可以看出,在 6 幅图像中,LOG-FAST 算子点重复率较高。测试表明,LOG-FAST 角点算子的光照不变性好,抗噪声能力强,重复率高。

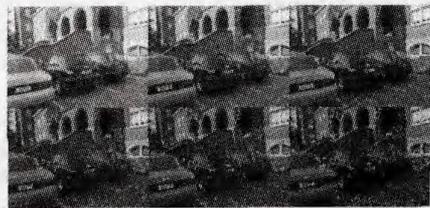


图 5 角点重复率测试图片(从左到右,从上到下顺序编号为 1—6)

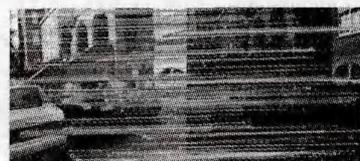


图 6 图片 1 和图片 6 的配准效果图

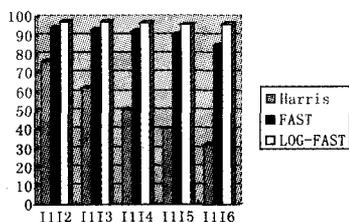


图7 不同算子的点重复率

结束语 为提高角点检测的时间效率以及鲁棒性,基于FAST算子,并结合图像增强技术以及拉普拉斯-高斯边缘提取思想,提出了快速鲁棒的LOG-FAST角点算子。算法首先使用直方图均衡化方法进行图像增强,然后运用拉普拉斯-高斯函数对图像进行卷积,从而实现噪声最大化抑制和边缘增强,最后使用FAST算子检测角点。经过充分实验测试,LOG-FAST算子保留了FAST算子时间效率高的特点,还具有光照不变性、抗噪声能力强、点重复率高、鲁棒性好等优点。该算子可应用于实时视频图像的处理应用场合,如实时全景图像构建、图像配准、智能识别以及实时车载系统等。

参考文献

[1] 燕鹏,安如. 基于FAST改进的快速角点探测算法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1104-1108, 1115

[2] Stephens M J, Harris C G. A combined corner and edge detector [C] // Proceedings Fourth Alvey Vision Conference. Manchester, 1988: 147-151

[3] 杨莉,张弘,李玉山. 一种快速自适应RSUSAN角点检测算法[J]. 计算机科学, 2004, 31(05): 198-200

[4] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features [C] // International Conference on Computer Vision. Corfu,

Greece, 1999: 1150-1157

[5] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110

[6] Bay A E H, Tuytelaars T, Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features[J]. Computer Vision and Image Understanding (CVIU), 2008, 110(3): 346-359

[7] Drummond T, Rosten E. Fusing points and lines for high performance tracking [C] // IEEE International Conference on Computer Vision. 2005: 1508-1511

[8] 严国萍,戴若愚,潘晴,等. 基于LOG算子的自适应图像边缘检测方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3): 85-87, 102

[9] 吴熙,钱盛友. 基于LoG算子的图像边缘增强算法的改进[J]. 电气电子教学学报, 2007, 29(4): 25-27

[10] 关斌. 一种改进的自适应各向异性LOG算子[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(12): 2992-2994, 3007

[11] 吕冀,汪渤,高洪民. 快速SUSAN-Laplace角点算法[J]. 光学技术, 2008, 34(06): 873-876

[12] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing (3 ed.) [M]. Prentice Hall, 2008

[13] Marr D. Vision: A Computational Investigation into the Human-Representation and Processing of Visual Information [M]. New York: Freeman, 1982

[14] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection [C] // European Conference on Computer Vision. 2006: 430-443

[15] Demaine E, Bremner D, Erickson J, et al. Output-sensitive algorithms for computing nearest-neighbor decision boundaries[J]. Discrete and Computational Geometry, 2005, 33(4): 593-604

(上接第239页)

究成果。在文献[11]中, Lin, Tang 利用一阶逻辑证明了阿罗定理, 其中的基础证明步骤是由计算机程序完成的。在文献[9]中, Grandi, Endriss 对阿罗定理也进行了一阶逻辑的形式化, 这为运用自动推理工具完全自动证明阿罗定理等类似不可能性结论提供了前期理论准备。虽然本文判断聚合逻辑JAL的语言可以被翻译为一阶逻辑的语言, 但这里的形式化与文献[9, 11]中形式化之间的联系还需要进一步探究。这些将是今后的重要研究方向。

参考文献

[1] Ågotnes T, van der Hoek W, Wooldridge M. Towards a logic of social welfare[C] // The 7th Conference on Logic and the Foundations of Game and Decision Theory (LOFT 06), 2006

[2] Ågotnes T, van der Hoek W, Wooldridge M. On the logic of preference and judgment aggregation[J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2011, 22: 4-30

[3] Arrow K J. Social Choice and Individual Values (2d edition) [M]. New York: Wiley, 1963

[4] Blackburn P, de Rijke M, Venema Y. Modal Logic[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001

[5] Blackburn P, van Benthem J, Wolter F. Handbook of Modal Logic[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007

[6] Dietrich F, List C. Arrow's theorem in judgement aggregation [J]. Social Choice and Welfare, 2007, 29(1): 19-33

[7] Ehlers L, Storcken T. Arrow's possibility theorem for one dimensional single-peaked preferences[J]. Games and Economic Behavior, 2008, 64(2): 533-547

[8] Gaertner W. A Primer in Social Choice Theory[M]. New York: Oxford University Press, 2009

[9] Grandi U, Endriss U. First-order logic formalisation of Arrow's Theorem[C] // Logic Rationality and Interaction, LORI-II 2009. Springer Press, 2009

[10] Grossi D. Correspondences in the Theory of Aggregation[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010, 6006: 34-60

[11] Lin F, Tang P. Computer-aided proofs of Arrow's and other impossibility theorems[C] // Proceedings of the 23rd AAAI conference on artificial intelligence, 2008: 114-1109

[12] List C. The theory of Judgment aggregation: An introductory review. Synthese (forthcoming) [EB/OL]. <http://personal.lse.ac.uk/list/PDF-files/ReviewPaper.pdf>

[13] List C, Puppe C. Judgment aggregation: a survey. The Oxford Handbook of Rational and Social Choice[M] // Anand P, Pattanaik P, Puppe C, eds. New York: Oxford University Press, 2009

[14] 兰继斌,王艳青,韦晓静. 获取决策者偏好信息的一种决策方法[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24(11): 97-101