

# 基于对角线偏移的 SURF 算子改进

谭 松,高 珏,刘有科,许华虎  
(上海大学,上海 200444)

**摘 要:**由于 SURF 算子对光照仅有部分的不变性,从而在光照条件变化大的环境下可能会导致提取的特征数与匹配数减少的不足。为了克服该不足,文中深入分析光照变化对 SURF 算子对特征提取的影响,并提出利用对角线偏移模型对 SURF 算子进行改进,统一输入图像的光照信息,使得改进后的特征算子对光照的变化具有更强的不变性,从而使得改进后的算法在较大光照变化的条件下依旧能够稳定地提取特征点及匹配。

**关键词:**加速鲁棒特征;特征提取;光照;对角线偏移

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)11-0001-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.11.001

## An Improvement of SURF Based on Diagonal Offset

TAN Song,GAO Jue,LIU You-ke,XU Hua-hu  
(Shanghai University,Shanghai 200444,China)

**Abstract:**Since SURF only is partly invariant for illumination,if it is applied into the variable illumination changing scene,the performance of features and matching will decrease highly. In order to overcome the drawback,make a deeper analysis about how the illumination influences the performance of SURF,and improve the original SURF with uniform illumination by combining the diagonal-offset model. The improved algorithm has a stronger ability about invariant for illumination,so that can get stable feature points even under a big illumination changing and match.

**Key words:**SURF;feature extraction;illumination;diagonal-offset

## 0 引 言

随着现代多媒体技术的发展,全景图拼接的应用越来越广泛<sup>[1-2]</sup>。在基于特征的图像拼接领域中,D. Lowe<sup>[3-4]</sup>提出 SIFT 算子以后,由于 SIFT 算子对尺度、旋转、光照等具有较强的不变性,因此,SIFT 算子很快成为图像拼接领域的经典算法<sup>[5]</sup>,同时对 SIFT 算子的相关改进也越来越为各个学者所研究<sup>[6]</sup>。Herbert Bay 等<sup>[7-8]</sup>从 D. Lowe 的算法中得到启发,依据整数图像和 Hessian 矩阵提出了加速鲁棒特征(Speed-Up Robust Feature,SURF),用维度较低的描述符来描述提取的图像特征,同时保证了算法对图像尺度及旋转的不变性,虽然在特征点数目及唯一性方面比 SIFT 算子稍差,但是由于维度的降低,大大减少了算法的复杂度,因此广泛应用于快速特征提取与匹配。但是由于 SURF 算子仅对光照变化具有部分不变性,在某些光照多变的应

用中并不适用(如视频拼接、阴暗图片处理),众多学者也为如何加强 SURF 算子对光照不变性做了更深入的研究。利用 SURF 算子进行快速图像序列拼接<sup>[9]</sup>、SURF 算子在彩色图像中的配准<sup>[10]</sup>以及 SURF 算子在某些特定应用中的改进<sup>[11-12]</sup>等等。Hyunsup Yoon 等<sup>[13]</sup>分析了 SURF 的全局颜色特征,Marcelo R. Petry 等<sup>[14]</sup>分析了颜色不变方法。

## 1 光照不变模型

体反射的几何分布可以在任何方向影响反射光线,因此正如 Lambertain 所证明这些同向各性的表面的亮度是一样的而不管视角是否相同。假定一个场景包含具有 Lambertian 反射的表面的特性,那就说明图像  $I$  可以用传感器队列中的表面反射  $S(\lambda, x_{obj})$  和光谱能量分布  $E(\lambda, x_{obj})$  的积分来建模<sup>[8]</sup>。

收稿日期:2014-01-05

修回日期:2014-04-10

网络出版时间:2014-09-11

基金项目:国家重大科技专项课题(2009ZX04001-111)

作者简介:谭 松(1989-),男,硕士,研究方向为图像多媒体技术;高 珏,副教授,研究方向为多媒体、Internet 技术和嵌入式应用等;许华虎,教授,博士生导师,中国计算机学会高级会员,研究方向为人机交互、图像处理、多媒体网络技术等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140911.1022.052.html>

$$I(x_i) = \int E(\lambda, x_{\text{obj}}) S(\lambda, x_{\text{obj}}) p(\lambda) d\lambda$$

其中,  $p(\lambda)$  是波长为  $\lambda$  的光的密度;  $x_{\text{obj}}$  是在世界坐标系的目标位置;  $x_i$  是在图像坐标系的位置。

假定传感器对一个特定的波长有反应,因此可以用 Dirac 的  $\lambda$  函数对传感器反应进行近似。因此可以对上式进行简化,即对位置  $x_i$  的密度  $I_k(x_i)$  可用传感器  $k \in \{R, G, B\}$  来测定。

$$I_k(x_i) = E(x_{\text{obj}}) S(x_{\text{obj}})$$

针对室外或室内、多云或阴雨等不同的光照条件,应用最广的就是对角线模型 (Diagonal Model, DM), 即在颜色空间里作对角线变换。根据对角线模型,为了实现图像颜色不变,可以通过适当的转换将具有未知光照的原图像  $I_o$  映射到具有标准光照的图像  $I_c$ 。Finlayson 提到当映射接近饱和的颜色时,DM 模型存在不足,因此增加了一个包含扩散光线的偏移来改进 DM 模型,即对角线偏移模型。

$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_o \\ G_o \\ B_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{bmatrix}$$

通过对角线偏移模型,光照不变性可以通过标量  $(a, b, c)$  和偏移量  $(o_1, o_2, o_3)$  的值分成五种不同的分类。Ebner 提出的基于局部空间平均颜色的计算模型定义了人类视觉系统是对图像像素进行平均处理。并且局部空间平均颜色的迭代计算和输入图像与高斯内核进行卷积的操作相类似。如果从局部的观点来看灰度世界,就可以估测每个图像像素周围的光度颜色。对给定的局部空间平均颜色  $a_k$ , 可以通过以下公式来获得局部颜色不变描述符  $O_k$ :

$$O_k(x, y) = \frac{I_k(x, y)}{2a_k(x, y)} \approx \frac{S_k(x, y) E_k(x, y)}{E_k(x, y)} \approx S_k(x, y)$$

## 2 SURF 的光照不变性分析

Herbert Bay 和 Tinne Tuytelaars 等从 SIFT 中得到启发而提出 SURF 算子。SURF 算子对尺度和旋转具有旋转不变性,对光照变化具有部分不变性,此外,特征点提取的速度也是非常之快,因此广泛应用于快速特征提取与匹配。

SURF 算子从整数图像出发,给定一个输入图像  $I$  和一个点  $(x, y)$ ,那么这个整数图像  $I_\Sigma$  就是从原点到这个点的所有值的总和,公式如下:

$$I_\Sigma(x, y) = \sum_{i \leq x} \sum_{j \leq y} I(x, y)$$

那么整数图像就可以利用三次操作就能够快速计算一个区域内的值,若要计算某一区域如  $ABCD$  中的

值,则利用整数图像的性质能得到:

$$\sum_{ABCD} = \sum_A + \sum_D - \sum_B - \sum_C$$

此外, SURF 算子使用 Hessian 矩阵进行计算, Hessian 矩阵具有如下特性。对函数  $f(x, y)$ , 若  $f$  的二阶导数都存在,则  $f$  的 Hessian 矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2$$

若在点  $(x_0, y_0)$  行列式  $\mathbf{H} > 0$ , 则当  $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} > 0$  时,

点  $(x_0, y_0)$  为局部极小点, 当  $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} < 0$  时,  $(x_0, y_0)$  为局部极大值点。

因此,对应源图像  $I$  的一个点  $X = (x, y)$ , 它在尺度  $\sigma$  下的 Hessian 矩阵可以定义为:

$$\mathbf{H}(X, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(X, \sigma) & L_{xy}(X, \sigma) \\ L_{xy}(X, \sigma) & L_{yy}(X, \sigma) \end{bmatrix}$$

其中,  $L_{xx}(X, \sigma)$ ,  $L_{xy}(X, \sigma)$ ,  $L_{yy}(X, \sigma)$  分别是高斯二阶偏导和图像  $I$  在  $X$  点处的卷积。为了加速卷积的速度,采用了盒子型滤波器 (box filter) 对上面的滤波器进行近似,则 Hessian 的行列式可近似为:

$$\det(\mathbf{H}_{\text{approx}}) = D_{xx} * D_{yy} - (\omega D_{xy})^2$$

$$\text{其中, } \omega = \frac{|L_{xx}(\sigma)|_F |D_{yy}(\sigma)|_F}{|L_{yy}(\sigma)|_F |D_{xx}(\sigma)|_F} \approx 0.9。$$

在尺度空间中构建金字塔图层时, SURF 图像大小保持不变,改变的是滤波器的大小。例如滤波器的初始大小是  $9 * 9$ , 接着就是  $15 * 15$ ,  $21 * 21$ ,  $27 * 27$ 。为了得到兴趣点的位置,采用在  $3 * 3 * 3$  的邻域内进行非极大值抑制,检测到的 Hessian 矩阵的行列式极大值还要在尺度和图像空间内做个内插。

最后在圆形区域计算 Harr 小波响应,以  $\frac{\pi}{3}$  的滑

动窗口,计算窗口内响应总和得到主方向。最后沿着主方向构建一个方形区域并将方形区域划分为  $4 * 4$  的子区域,对每一个子区域又进行  $5 * 5$  的样本点划分,计算  $d_x, d_y, |d_x|, |d_y|$  就得到了 32 维的特征。

为了分析光照对 SURF 算子响应的影响,先考虑一个在点  $X = (x, y)$  处具有像素密度为  $I_o(x, y)$  的单通道图像  $I_o$ , 则可以通过中央差分方法来得到  $I_o(x, y)$  的二阶导数。

$$\frac{\partial^2 I_o(x, y)}{\partial x^2} = I_o(x + 1, y) - 2I_o(x, y) + I_o(x - 1, y)$$

对两幅有关联的图像  $I_o, I_u$ , 其中不知道  $I_o$  的亮度。假定这两幅图像的对角线偏移模型是通过一个标量  $\alpha$  和一个偏移向量  $\beta$  的线性转换,则  $I_u$  的像素密度

$I_u(x, y)$  为:

$$I_u(x, y) = \alpha I_o(x, y) + \beta$$

因此  $I_u(x, y)$  在点  $X$  处对  $x$  分量的二阶偏导数为:

$$\frac{\partial^2 I_u(x, y)}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 I_o(x, y)}{\partial x^2}$$

同理,  $I_u(x, y)$  在点  $X$  处对  $y, xy$  的二阶偏导数分别为:

$$\frac{\partial^2 I_u(x, y)}{\partial y^2} = \alpha \frac{\partial^2 I_o(x, y)}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial^2 I_u(x, y)}{\partial x \partial y} = \alpha \frac{\partial^2 I_o(x, y)}{\partial x \partial y}$$

可以看出,偏移量  $\beta$  对二阶导的结果没有任何影响,因为在求导时作为常数项的偏移量会被消掉,而二阶导的值与不同的标量  $\alpha$  却是呈比例关系。由于选择特征点舍弃那些斑点响应小于某一固定的阈值,因此,若是探测器的响应和光照条件有关,则当一个特征点在明亮的条件下时能够被探测器检测到,而当这个特征点处在灰暗的条件下时就无法被探测器检测到。SURF 算子的探测器对给定像素点  $I_u(x, y)$  的响应  $R_u(x, y)$  是给定 Hessian 矩阵的行列式:

$$R_u(x, y) = \frac{\partial^2 I_u(x, y)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I_u(x, y)}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 I_u(x, y)}{\partial x \partial y} \right)^2$$

联合上面几个公式,可得:像素点  $I_u(x, y)$  处的滤波响应  $R_u(x, y)$  值可以由 SURF 探测器在  $I_o$  处的响应值  $R_o(x, y)$  来表示,即:

$$R_u(x, y) = \alpha \frac{\partial^2 I_o(x, y)}{\partial x^2} \alpha \frac{\partial^2 I_o(x, y)}{\partial y^2} - \left( \alpha \frac{\partial^2 I_o(x, y)}{\partial x \partial y} \right)^2 = \alpha^2 R_o$$

由上式可知,像素点  $I_u(x, y)$  处的滤波响应  $R_u(x, y)$  值与  $\alpha$  呈指数关系,光照条件的变化将会很大程度上改变响应值,导致该特征点会被错误舍弃。

### 3 具有光照不变性的 SURF

大多数光照不变性算法有一个很大的局限性,即这些模型算法假设场景中的光线是均匀分布的。而在实际的环境中这是不可能的,总会有一些因素使得场景中的光线强度有些差异,例如一个房间内开着一盏灯,总体来看整个房间光线较为均匀,但是在某些角落里光线的强弱还是有很大的区别,当打开房间门时,又会使门处的光线发生变化,这时这些算法便得不到较好的效果。但是这恰恰可以利用局部空间平均颜色来解决这个问题,因为局部空间颜色是估算场景中每个点的光线,它的描述符就能够很好地处理现实世界场景的光照不变性。

可利用局部空间平均颜色对光线强度的不变性特

征来对 SURF 进行改进,也就是在进行特征抽取前进行一次预处理,虽然这次预处理会增加一定的运算,但是通过这次预处理可以大大提高算法对光照条件变化的不变性。同时,在使用局部空间平均颜色时,窗口的大小充当着非常重要的角色,当局部空间平均颜色使用在小范围的区域时能够使得特征点的可重复性达到非常好的效果。事实上,由于图像中的光线可能来自多种光照环境,使得当图像像素点的距离较长时,  $\alpha$  与  $\beta$  值会有较大的变化,因此,当在小范围的区域使用局部平均颜色时,对假设中的  $E_k(x, y) \approx 2a_k(x, y)$  才成立。当某个像素点接近饱和时,它的响应变化便和周围的点不一样,这就导致特征探测器在计算响应时有非线性的变化,同时降低了这个点在接下来的匹配过程中正确的匹配概率。因此,对在那些达到饱和状态的像素点就有可能在选择是否成为特征点时被舍弃掉。而这些接近饱和的点可能在别的光线不同的图像中表现为不饱和状态而被探测器认为是可能的特征点,这样对两幅图像进行匹配时就会导致错误匹配,即两幅具有相同区域但光线强度不同的图像进行匹配时,可能导致特征点匹配错误或匹配成功的概率很低。基于此,可基于像素密度把待探测的特征分成两类:主特征与候选特征。如果在某个图像区域的像素密度小于阈值上界而大于阈值下界时,则被归类为主特征,其他区域的像素则被归类为候选特征。其中阈值上界与阈值下界则由场景中光线的强度来决定。

在特征匹配阶段,显然,主特征之间更易匹配成功,而为了防止某些候选特征被武断舍弃,可再用原图像的候选特征与目标图像的主特征进行匹配,而候选特征之间不再进行匹配,这样既能够提高配准成功的数量,也可以减少匹配集的大小,减少算法的复杂度。

### 4 实验分析

图 1 中,图(a)和图(b)分别是即将与图(c)进行匹配的图像,同时图(b)是通过图(a)降低图像的亮度而得到。下面分别通过文中对 SURF 算子改进后的算法与原始 SURF 算法关于光照不同的特征提取与匹配做比较,证明改进后的算法具有对光照的不变性。



图 1 实验示例图

图 2 表示利用文中改进后的算法分别对亮度正常



图像和亮度昏暗图像进行特征匹配。



图 2 利用改进后的 SURF 算法对图像进行匹配

图 3 表示利用原始 SURF 算法分别对亮度正常图像和亮度昏暗图像进行特征匹配。



图 3 利用原始 SURF 对图像进行匹配

文中算法和原始算法性能的比较如表 1 所示。

表 1 文中算法和原始算法性能的比较

	图 (a) 特征提 取/个	图 (b) 特征提 取/个	图 (c) 特征提 取/个	图 (a) 与 图 (c) 特 征匹配/对	图 (b) 与 图 (c) 特 征匹配/对
文中改进 后的算法	779	321	743	43	41
原始 SURF	753	112	697	41	12

从表 1 可以看出,在正常的光照条件下,改进后的 SURF 算法和原始 SURF 算法在特征提取与匹配中的表现都非常好,不过改进后的 SURF 算法由于保存了图像原始的光照信息,因此在特征点数目与匹配上比原始 SURF 算法略胜一筹。但是在阴暗的条件下,可以看到改进后的 SURF 算法依旧能够保持良好的特征提取与匹配,而原始的 SURF 算法在阴暗的条件下特

征提取与匹配的性能大大下降。

5 结束语

针对 SURF 特征算子仅对光照变化具有部分不变性,而在某些应用中(如视频处理)光照的多变性,文中重点分析了光照对 SURF 算子性能的影响,并利用对角线偏移模型就 SURF 算子进行改进,保存了原始图像的光照信息。实验结果表明,改进后的算法在光照变化较大的场景中依然具有良好的性能。

参考文献:

[1] 蔡丽欢,廖英豪,郭东辉. 图像拼接方法及其关键技术研究[J]. 计算机技术与发展,2008,18(3):1-4.

[2] 杨 龙,吴福虎,汤 进,等. 图像拼接在红外在线监测系统中的应用[J]. 计算机技术与发展,2011,21(12):194-197.

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

[4] Brown M, Lowe D G. Invariant features from interest point groups[C]//Proceedings of the 13th British machine vision conference. [s. l.]:[s. n.],2002:253-262.

[5] 李云霞,曾 毅,钟瑞艳,等. 基于 SIFT 特征匹配的图像拼接算法[J]. 计算机技术与发展,2009,19(1):43-45.

[6] 肖若秀,蔡光程,贾建波. 利用旋转模板匹配方法对 SIFT 算法的改进[J]. 计算机技术与发展,2009,19(5):127-129.

[7] Bay H,Tuytelaars T. SURF:speeded up robust features[C]//Proc of European conference on computer vision. [s. l.]:[s. n.],2006:404-417.

[8] Bay H,Ess A,Tuytelaars T,et al. SURF:speeded up robust features[J]. Computer Vision and Image Understanding,2008,110(3):346-359.

[9] 杨云涛,冯 莹,曹 毓,等. 基于 SURF 的序列图像快速拼接方法[J]. 计算机技术与发展,2011,21(3):6-9.

[10] 石雅笋,刘晓云,陈 奋. 基于 SURF 的彩色图像配准[J]. 红外技术,2010,32(7):415-419.

[11] 周军太,龙永红. 一种改进 SURF 算法的图像配准[J]. 湖南工业大学学报,2011,25(2):95-99.

[12] 杜冬梅,王红旗,田昆鹏,等. 一种改进的快速 SURF 算法[J]. 科学技术与工程,2013,13(5):1350-1353.

[13] Yoon H,Chung Hwan-Ik,Hahn H. SURF algorithm with color and global characteristics[C]//Proc of ICROS-SICE international joint conference. [s. l.]:[s. n.],2009:183-187.

[14] Petry M R,Moreira A P. Increasing illumination invariance of SURF feature detector through color constancy[C]//Proc of 16th Portuguese conference on artificial intelligence. [s. l.]:[s. n.],2013:259-270.

# 基于对角线偏移的SURF算子改进

作者：[谭松](#)，[高珏](#)，[刘有科](#)，[许华虎](#)，[TAN Song](#)，[GAO Jue](#)，[LIU You-ke](#)，[XU Hua-hu](#)  
作者单位：[上海大学, 上海, 200444](#)  
刊名：[计算机技术与发展](#)  
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)  
年，卷(期)：2014(11)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201411001.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201411001.aspx)