



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2016
01
VOL.21

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



医学图像处理 P69

中国图象图形学报

刊名题字：宋健 | 月刊（1996年创刊）



第21卷第1期（总第237期）
2016年1月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文
编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会
邮政信箱 北京9718信箱
邮 编 100101
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-64807995
网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

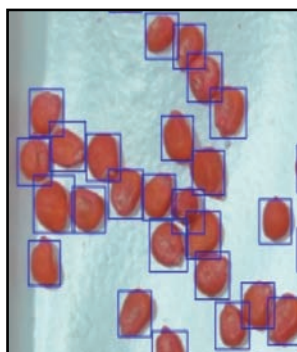
Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China
Zip code 100101
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-64807995
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



多尺度特征融合与极限学习机的玉米种子检测
(第0024页)



深度卷积神经网络的显著性检测(第0053页)



双树复小波域的MRI图像去噪(第0104页)

图像处理和编码

空时形状预测与高效编码

朱仲杰, 王玉儿, 蒋刚毅..... 1

第二小方向导数信息熵的兴趣点检测

卢健, 黄杰, 潘峰..... 8

采用面积采样的反走样字符旋转算法

郑凯文, 刘文波..... 17

图像分析和识别

多尺度特征融合与极限学习机的玉米种子检测

柯道, 杜明智..... 24

图像理解和计算机视觉

结合NSCT和压缩感知的红外与可见光图像融合

陈木生..... 39

Plücker直线描述的空间后方交会

盛庆红, 陈姝文, 肖晖, 张斌, 王青, 费利佳..... 45

深度卷积神经网络的显著性检测

李岳云, 许悦雷, 马时平, 史鹤欢..... 53

计算机图形学

以优先点为中心的Delaunay三角网生长算法

尤磊, 唐守正, 宋新宇..... 60

医学图像处理

快速数字影像重建的2维/3维医学图像配准

刘坤, 吕晓琪, 谷宇, 于荷峰, 任国印, 张明..... 69

小波-Lagrange方法进行医学图像层间插值

武士想, 尚鹏, 王立功..... 78

遥感图像处理

多主体框架下结合最大期望值和遗传算法的SAR图像分割

张金静, 李玉, 赵泉华..... 86

第十届图像图形技术与应用学术会议

视差互信息引导下的立体航空影像与LiDAR点云自动配准

吴军, 胡彦君, 饶云, 彭智勇..... 95

双树复小波域的MRI图像去噪

黄学优, 张长江..... 104

快速定位图像尺度和区域的3维跟踪算法

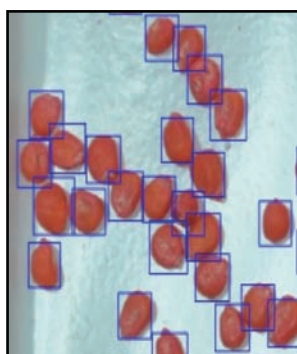
赵奇可, 孙延奎..... 114

局部不变特征点的精度指标

滕日, 周进, 蒋平, 崔雄文..... 122

CONTENTS

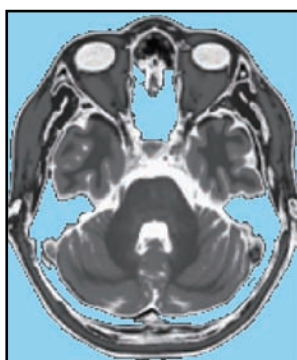
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Detection of maize seeds based on multi-scale feature fusion and extreme learning machine(P0024)



Saliency detection based on deep convolutional neural network(P0053)



MRI denoising based on dual-tree complex wavelet transform(P0104)

Image Processing and Coding

- Spatio-temporal shape prediction and efficient coding
Zhu Zhongjie, Wang Yuer, Jiang Gangyi 1
- Interest point detection by using information entropy of the second small direction derivative
Lu Jian, Huang Jie, Pan Feng 8
- Anti-aliasing algorithm for character rotation based on area sampling
Zheng Kaiwen, Liu Wenbo 17

Image Analysis and Recognition

- Detection of maize seeds based on multi-scale feature fusion and extreme learning machine
Ke Xiao, Du Mingzhi 24

Image Understanding and Computer Vision

- Image fusion of visual and infrared image based on NSCT and compressed sensing
Chen Musheng 39
- Space resection method based on Plücker line
Sheng Qinghong, Chen Shuwen, Xiao Hui, Zhang Bin, Wang Qing, Fei Lijiao 45
- Saliency detection based on deep convolutional neural network
Li Yueyun, Xu Yuelei, Ma Shiping, Shi Hehuan 53

Computer Graphics

- Growth algorithm centered on priority point for constructing the Delaunay triangulation
You Lei, Tang Shouzheng, Song Xinyu 60

Medical Image Processing

- The 2D/3D medical image registration algorithm based on rapid digital image reconstruction
Liu Kun, Lyu Xiaoqi, Gu Yu, Yu Hefeng, Ren Guoyin, Zhang Ming 69
- Inter-slice interpolation for medical images by using the wavelet-lagrange method
Wu Shixiang, Shang Peng, Wang Ligong 78

Remote Sensing Image Processing

- Combining the expectation maximization and genetic algorithms for SAR image segmentation within a MAS framework
Zhang Jinjing, Li Yu, Zhao Quanhua 86

Column of IGIA' 2015

- Automatic registration of aerial stereo imagery to LiDAR data through iterative parallax mutual information computation
Wu Jun, Hu Yanjun, Rao Yun, Peng Zhiyong 95
- MRI denoising based on dual-tree complex wavelet transform
Huang Xueyou, Zhang Changjiang 104
- Three dimensional tracking with fast locating of image scale and area
Zhao Qike, Sun Yankui 114
- Extraction precision of local invariant feature points
Teng Ri, Zhou Jin, Jiang Ping, Cui Xiongwen 122

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2016)01-0008-09

论文引用格式: Lu J, Huang J, Pan F. Interest point detection by using information entropy of the second small direction derivative[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(1): 0008-0016. [卢健, 黄杰, 潘峰. 第二小方向导数信息熵的兴趣点检测[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(1): 0008-0016.][DOI:10.11834/jig.20160102]

第二小方向导数信息熵的兴趣点检测

卢健, 黄杰, 潘峰

西安工程大学, 西安 710048

摘要: **目的** 为了提高兴趣点检测的定位准确性和对噪声的鲁棒性, 提出利用图像轮廓线及其邻域内像素点方向导数信息熵检测兴趣点的方法。 **方法** 首先利用多方向 Gabor 虚部滤波器提取图像灰度变化信息得到第二小方向导数。然后利用 Canny 边缘检测器提取边缘映射, 并填补断裂边缘映射提取边缘轮廓线。最后求解图像边缘轮廓线及其邻域内像素点对应的第二小方向导数所对应的信息熵归一化值并作为新的兴趣点测度。和直接由灰度变化信息及分析边缘轮廓形状或曲率提取兴趣点的方法相比, 本文算法结合了两类算法的思想, 利用轮廓线上及其邻域内的像素点梯度方向信息熵值作为兴趣点测度。同时不同于同质及边缘区域的梯度方向变化, 兴趣点处的梯度方向变化信息呈现各向异性的特性, 利用兴趣点第二小方向导数(第一小方向导数可能为零)对应的信息熵值作为新的兴趣点测度可提高算法的定位准确性。 **结果** 通过对检测图像进行仿射变换和加入高斯噪声处理后, 分别利用 Harris 算子、CSS 算子、He&Yung 算子和本文算法提取图像兴趣点, 并比较各算法在仿射变换和高斯噪声情况下检测到的兴趣点的平均重复率和定位误差两个性能指标的平均值。其中本文算法的性能指标平均值为 1.625, 远高于 Harris(3.25)、He&Yung(2.625) 和 CSS(2.5) 三大兴趣点检测算子。 **结论** 通过与典型的 3 种算法相对比, 本文算法具有较好的平均重复率及噪声鲁棒性, 尤其是图像在外界干扰的旋转变换和尺度变换下对兴趣点的定位性有着更好的检测性能。

关键词: 兴趣点检测; Gabor 虚部滤波器; 灰度变化信息; 第二小方向导数; 信息熵

Interest point detection by using information entropy of the second small direction derivative

Lu Jian, Huang Jie, Pan Feng

Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

Abstract: **Objective** This paper proposes a new interest point detection method by using contour shape and the direction derivative information entropy of surrounding pixels. The proposed method can improve localization accuracy and noise robustness. **Method** First, the multi-direction imaginary parts of Gabor filters are used to extract the gray variation information of input images to acquire the second small direction derivative. Scale multiplications are used as the measure to detect interest points. The proposed method is based on contour-based methods and is improved in two ways: the information of edge shape and the gray variation are combined to detect the interest points; the sensitivity of scale multiplication to local

收稿日期: 2015-02-07; 修回日期: 2015-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(61040055); 陕西省教育厅科学研究项目(2013JK1109); 西安工程大学控制科学与工程学科建设经费资助项目(107090811)

第一作者简介: 卢健(1978—), 男, 副教授, 2015 年于西北工业大学获兵器科学与技术专业工学博士学位, 主要研究方向为 AUV 协同导航、目标跟踪、图像处理与模式识别。E-mail: happy_lujian@aliyun.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61040055); Foundation of Shanxi Educational Committee(2013JK1109)

variation and noise on the edge contour is reduced. Second, the Canny edge detector is used to extract edge maps and fill gaps to obtain the edge contour. Third, the second small direction derivative information entropy of the edge contour pixel and its surrounding pixels is computed. The normalized entropy is used as new corner measure by comparing with the threshold. Finally, non-maximum suppression is applied to the result obtained in the third step. A local window (9×9) is used to slide through all the pixels of the edge contour. If the center pixel of the window is the local maxima within the window, the central pixel scale product is retained; otherwise, the center pixel will be set to zero. **Result** Compared with the gray method, which analyzes the contour shape, or the curvature-based method, the proposed method combines the idea of two algorithms that use the gradient direction entropy of the contour pixel and its neighbor pixels as the corner measure. Furthermore, unlike the gradient direction variation in homogeneous regions and edge lines, the information variation on the interest point presents an anisotropic feature. The information entropy according to the second small direction derivative (the first small direction derivative may be zero) is used as a new corner measure to improve localization accuracy. The proposed method has an average score of 1.625 in the performance index, which is significantly higher than the method of Harris (3.25) and He and Yung (2.625) and the CSS (2.5) interest point detection operator. **Conclusion** Compared with the three state-of-art algorithms, our approach is competitive with respect to the repetitive rate of interest point, detection accuracy, and noise robustness.

Key words: interest point detection; the imaginary parts of Gabor filters; gray variation information; second small gradient direction; information entropy

0 引言

图像特征点不仅可以保留图像中物体的重要特征信息还可以有效地减少信息处理的数据量。兴趣点具有图像稳定稀疏特征,到目前为止还没有确定的数学定义,兴趣点一般被认为是两条或几条图像边缘的交点,或者被认为是图像灰度变化较大的点。近几年,兴趣点检测被广泛的应用在3维重建,目标追踪,视觉重建及图像匹配中^[1-2]。依据兴趣点检测的方法的不同其算法大致可以分为3类^[3]:基于灰度强度变化^[4-8]、基于图像边缘轮廓^[9-12]及基于兴趣点模型匹配^[13-15]3类算法。

基于灰度强度变化的检测算法,主要是利用在图像兴趣点处其灰度强度变化大的特性来提取兴趣点。早在1977年, Moravec^[4]提出,在图像中,同质区域的灰度变化强度小,在边缘处沿着垂直于边缘脊的方向灰度强度变化大,而在兴趣点处多个方向的灰度变化强度大。Harris等人^[5]继承了Moravec的想法。利用同性高斯滤波器平滑图像求其沿X,Y轴方向的一阶偏导数并构造自相关矩阵,通过自相关矩阵特征值构造兴趣点响应函数提取兴趣点。由于仅在两个方向上提取灰度变化信息,使得Harris算法仅能很好地检测出“L”型兴趣点^[6]。为了能更好地改进Harris算法的检测性能,许多不同的

想法被嵌入到Harris检测器中,如双阈值选择法^[7]等。多尺度^[8]及自适应尺度选择等。这些算法均是为得到更好的灰度结构变化信息来改进Harris检测器。

基于图像边缘轮廓的算法,首先提取图像边缘映射,然后分析边缘映射上平面曲线的形状,最后利用局部曲率最大提取兴趣点。曲率尺度空间(CSS)^[9]方法是这类方法的典型算法。但是这类算法存在着以下3个问题:1)通过计算曲率提取兴趣点,会使得此算法对噪声很敏感。2)应该选用多大尺度的滤波器来平滑图像。选择的尺度过大图像很多细节信息将会被丢失,选择小尺度虽然可以保留图像的细节信息但又会造成对噪声敏感的问题。3)全局阈值的选取。Awrangzeb等人^[10]提出了基于点到弦距离累加技术(CPDA),不再利用二阶导数的方法求解曲率,而是通过累加的技术提取兴趣点,改善了CSS对噪声敏感的问题,但是还存在对微弱兴趣点不理想的问题。He与Yung^[11]在CSS的基础上又提出了自适应曲率门限解决了全局门限的问题。许多学者相继提出改进的CSS算法^[13],但都是基于边缘轮廓的几何性质。基于边缘轮廓的检测算法,对边缘检测的要求很高,曲线的微小变化或边缘检测器对噪声很敏感则很容易影响到检测性能。

基于模型的兴趣点检测算法,通过构建不同类型的参数模型和图像兴趣点匹配来检测兴趣点。大

多数基于模型的算法通过各向同性高斯核来构造简单的兴趣点模型,如 Rohr 等人^[14]。水鹏朗等人^[15]和章为川等人^[16]提出利用各向异性高斯方向导数滤波器构建 L-型、Y-型和 X-型兴趣点模型及星型兴趣点模型,同样是分析了各向异性高斯方向导数较之于各向同性高斯核构建参数模型的优点。基于模型的兴趣点检测算法,还有如 SUSAN 检测器及其改进算法^[17]提取图像兴趣点。基于模型的检测器存在着很难覆盖图像中所有兴趣点的问题,在实际的应用中常受到限制。

上述检测器大部分是基于同性高斯滤波器提取图像特征,文献[15]提出,同性高斯核对不同兴趣点模型响应没有区别且噪声鲁棒性也不好。图像灰度信息的提取会影响到算法的检测性能,且 Gabor 滤波器拥有和脊椎动物视觉皮层感受野响应近似相似的性质,其常被运用在特征提取、指纹识别、人脸识别等邻域。2014 年, Zhang 等人^[18]提出使用 Gabor 滤波器虚部提取兴趣点的性能优于各向同性高斯滤波器。尺度选择会直接影响到提取图像灰度信息的质量,因此采用多尺度提取图像灰度变化信息,可以提高算法性能。文献[19]指出边缘像素的梯度方向呈现有规律的变化模式,而在兴趣点处表现为局部各向异性方向导数所对应的方向。结合图像轮廓及其邻域上的第二小各项异性方向导数所对应的方向,利用边缘线上及其邻域像素的方向信息熵值^[20]可以很好地反映出图像中所需信息的信息量。本文提出基于多尺度多方向 Gabor 滤波器虚部提取图像灰度信息,利用不同尺度下边缘线上及其邻域灰度信息变化方向导数信息熵归一化乘积作为兴趣点测度提取兴趣点的方法。

1 2 维 Gabor 滤波器及新兴趣点测度

1.1 2 维 Gabor 虚部滤波器

Gabor 滤波器在提取图像灰度变化信息上^[18,20-21]的优点被广泛的应用。Zhang 等人^[18]证明 Gabor 虚部滤波器可以很好地提取灰度变换信息从而提出了基于多方向 Gabor 虚部滤波器的兴趣点检测算法。Gabor 虚部滤波器还被应用到边缘检测中^[21]。由此可见 Gabor 虚部滤波器可以成为提取灰度变换信息有效的工具。一个 2 维离散 Gabor 虚部滤波器表达式为

$$\begin{aligned}\varphi(u, v; k) &= \frac{f^2}{\pi\gamma\eta} \exp\left(-\left(\frac{f^2}{\gamma^2}u'^2 + \frac{f^2}{\eta^2}v'^2\right)\right) \times \\ &\quad \sin(2\pi fu') \\ u' &= u\cos(\theta_k) + v\sin(\theta_k) \\ v' &= -u\sin(\theta_k) + v\cos(\theta_k) \\ \theta_k &= \frac{2\pi k}{K}, k=0, 1, \dots, K-1\end{aligned}\quad (1)$$

式中, γ, η 为沿 u 轴和 v 轴方向的常数, 改变 γ, η 可以控制滤波器的形状。 u, v 为直角坐标系坐标, f 是滤波器的中心频率, K 表示总共方向的数目, θ_k 是第 k 个方向调制平面波和高斯主轴沿逆时针旋转的角度。如图 1 所示, 给出了一个 Gabor 虚部滤波器空域图 ($Z = \varphi(u, v, k)$)。

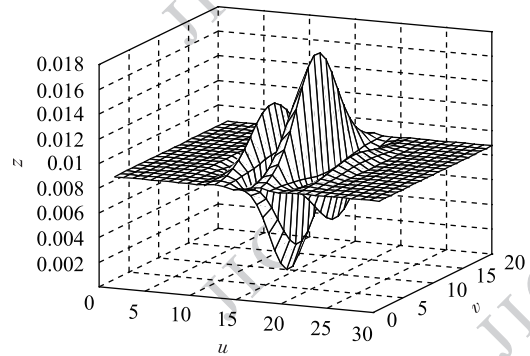


图 1 Gabor 虚部滤波器 $f=0.25, \theta=0, \gamma=1, \eta=2$

Fig. 1 imaginary parts of Gabor filters $f=0.25, \theta=0, \gamma=1, \eta=2$

将一组沿着不同方向离散 Gabor 虚部滤波器与输入图像 $I(m, n)$ 做卷积运算得到图像不同方向的方向导数幅值响应

$$\begin{aligned}\nabla I(m, n; f, k) &= I(m, n) * \varphi(m, n; f, \theta_k) = \\ &\quad \sum_{m_x} \sum_{n_y} I(m - m_x, n - n_y) \varphi(m, n; k)\end{aligned}\quad (2)$$

1.2 新兴趣点测度

由多方向的离散 Gabor 虚部滤波器与图像卷积运算可以得到不同方向的灰度变化信息。像素点位于图像不同区域灰度变化方向有着不一样的变化, 很多文献的算法^[5,21]均是通过寻找灰度信息变化的最大方向来提取兴趣点, 但由于噪声的影响使得非兴趣点的某方向的方向导数变为最大从而影响判断。一般而言, 对于兴趣点来说各个方向的方向导数都很大, 除了在边缘方向方向导数为零(也即第一小的方向导数)。这里采用提取第二小的灰度变化方向, 当某像素邻域内第二小方向导数大于训练设定的阈值时就可判断此处为兴趣点。在此定义第

二小的方向导数为

$$\alpha = S \left| \arg \min_{k=1,2,\dots,K} \{ |\nabla I_{\text{smooth}}(m,n;f,k)| \} \right| \quad (3)$$

由于兴趣点为灰度变化沿多个方向变化大的像素点其对应的方向信息熵大。为提高算法的定位准确性,兴趣点可以被看作是轮廓线的交点,所以利用轮廓线及其局部邻域内像素点第二小方向导数对应的信息熵作为新的兴趣点测度方法。设轮廓线上一个像素点为 P , 其局部邻域为 R_n , 若此邻域内对应每个第二小方向导数 α 像素个数为 T_α (显然边缘是没有第二小方向导数之说的), 邻域中所有像素点个数为 M , 则此邻域内对应方向为 α 的概率为

$$P_\alpha = \frac{T_\alpha}{M} \quad (4)$$

则以该轮廓线上像素点 q 的信息熵定义为

$$q_{\text{entropy}} = - \sum_{k=1}^K P_\alpha \log_2 P_\alpha, P_\alpha \neq 0 \quad (5)$$

对边缘像素点对应的熵值做归一化处理, 得到归一化后的信息熵值 $\bar{q}_i$ 为

$$\bar{q}_{i_{\text{entropy}}} = q_{i_{\text{entropy}}} \max \{ |q_{1_{\text{entropy}}}|, |q_{2_{\text{entropy}}}|, \dots, |q_{i_{\text{entropy}}}| \} \quad (6)$$

由定义可知, 新的角点测度利用边缘处与角点处各向异性高斯方向导数信息熵的不同来检测角点。在边缘处, 因为灰度变化的方向是有规律可循的, 因而它所对应的信息熵小; 而在角点处, 灰度变化方向是各向异性的, 从而对应的方向信息熵大。而前者以边缘曲线的几何特性为基础。除此之外, 新的角点测度无需对边缘曲线进行高斯平滑, 从而保证更为精确的定位精度。同时各向异性方向导数滤波器对噪声的稳健性是新的角点测度对图像噪声具有稳健性的直接原因。

1.3 算法的基本步骤

基于以上的内容, 本文算法的基本步骤如下:

1) 由式(2)求解多方向离散 Gabor 虚部滤波器和图像做卷积运算得到图像第二小方向导数的幅值响应。

2) 使用 Canny 边缘检测器^[22]提取图像的边缘映射, 填充边缘映射之间的缺口得到较为完整的边缘映射。

3) 由式(3)(4)(5)求边缘轮廓线上每个边缘像素点及其邻域内像素点的第二小方向导数 α 对应的概率 P_α 和方向信息熵 q_{entropy} 。并由式(6)对梯度方向信息熵归一化处理。

4) 归一化后的信息熵值 $\bar{q}_i$ 与设定阈值 T 比较, 若 $\bar{q}_i$ 大于阈值 T , 那么对应的边缘点作为候选兴趣点。

5) 在模版为 3×3 的邻域内, 对候选兴趣点进行非极大值抑制, 提取兴趣点。

本文算法流程如图2所示。

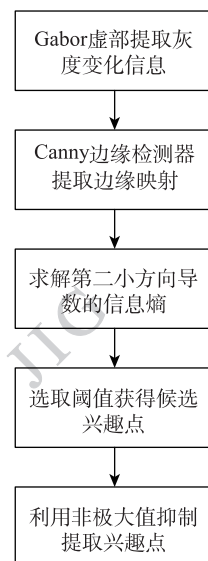


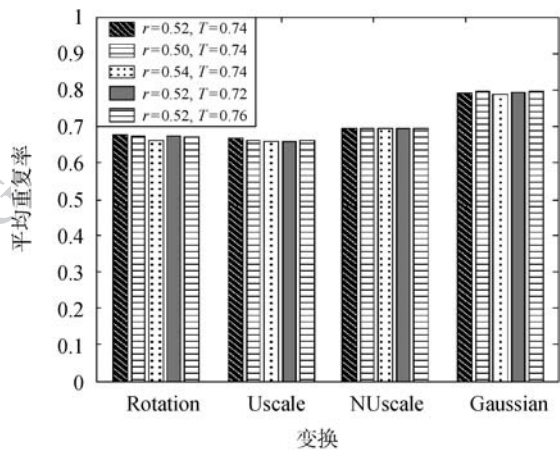
图2 本文算法流程

Fig. 2 The processing of proposed algorithm

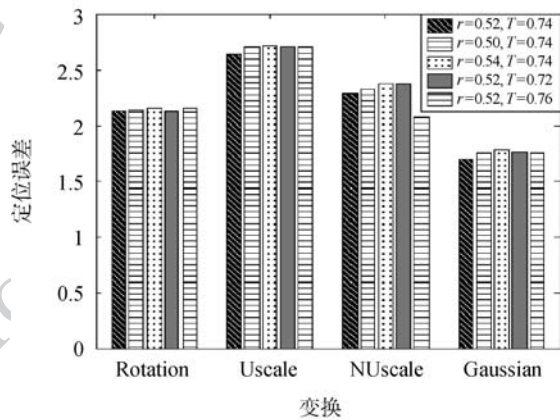
2 实验仿真与性能分析

为了验证提出算法的有效性, 将本文算法同 Harris 算法^[5], CSS 算法^[10], He & Yung 检测算法^[11], 在 MATLAB 上进行仿真实验比较。为了统一边缘标准, 提取图像边缘均采用各经典兴趣点检测算法中的 Canny 边缘检测器其高低门限设置为 0.35 和 0.2。本算法参数设置为中心频率 $f=0.2$, 为了使局部的整体概率和为 1, 算法中使局部邻域的像素个数等于各向异性高斯核的方向数。则当滤波窗口为 9×9 时, 方向数 K 选为 81 个方向, 尺度因子 $\gamma=0.52$, $\eta=\gamma^2$, 阈值 $T=0.74$, 非极大值抑制窗口 3×3 , 由图3可以看出, 改变尺度因子 γ 和阈值 T 的值对提出的算法有很大的影响性, 其中当 $\gamma=0.52$, $T=0.74$ 时有较好的鲁棒性 (较高的平均重复率和较低的定位误差)。其他算法均采用文献[5, 11-12]所设置的参数进行检测。

图4为积木及实验室参考兴趣点图像, 并且所参考兴趣点数分别为 59 和 249。图5为使用4种检测器对积木及实验室图像兴趣点检测的结果。



(a) 不同参数对检测兴趣点平均重复率的影响



(b) 不同参数对检测兴趣点定位误差的影响

图3 不同参数(γ, T)的选择对本文算法的影响
Fig. 3 Effect of different parameter changes (γ, T) on the proposed detector ((a) effect of average repeatability; (b) effect of localization error)

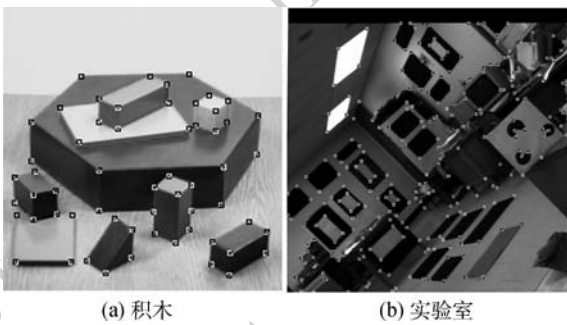


图4 实验图像参考兴趣点图像

Fig. 4 The reference interest point of the test image((a) block; (b) laboratory)

基于边缘轮廓的兴趣点检测算法,一般是使用边缘检测器提取边缘映射,然后使用高斯平滑,分析边缘轮廓的形状或者求解其曲率提取兴趣点。这样的方法容易带来对噪声敏感的问题且高斯尺度的选

择会对检测性能带来影响。不同与基于边缘轮廓的兴趣点检测算法,本文算法依据兴趣点是轮廓线的交点即兴趣点一定存在边缘轮廓线上,所以使用Canny边缘检测器提取边缘映射后,使用间隙填补的方法^[23]得到图像较为完整的边缘轮廓线,以便提高兴趣点的定位准确性。结合兴趣点处灰度变化信息各向异性的特性,将边缘轮廓线上像素点灰度变化方向信息结合在一起提取兴趣点,提高了算法的定位准确性。如图3、图4显示本文算法检测结果优于其他3种算法。

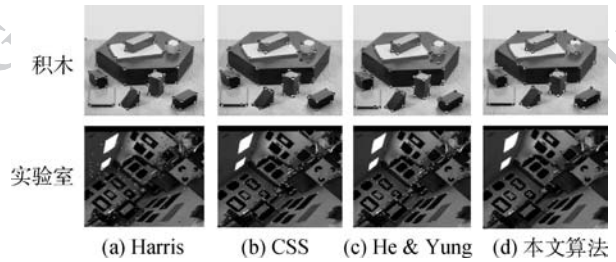


图5 4种兴趣点检测算子对积木和实验室的检测结果
Fig. 5 Blocks and laboratory test result by four kinds of interest point algorithm ((a) Harris; (b) CSS; (c) He&Yung; (d) the proposed algorithm)

表1总结了“积木”和“实验室”兴趣点匹配的结果,Harris算法检测出的兴趣点最少,说明基于灰度强度变化算法很大程度上比基于轮廓边缘算法有更大的错误兴趣点发生率。CSS和He & Yung检测算法是检测到真实兴趣点较多,兴趣点漏检数比起Harris小但错检数较大,这和它局部曲率测度有关。提出的新的算法配错误兴趣点数相比较较少,由此可以看出,本文兴趣点检测算法有较好的检测性能,即在错误兴趣点数和丢失兴趣点相对较少情况下,还能保持较高的兴趣点配准数。

表1 积木和实验室兴趣点匹配结果

Table 1 Matched result of 'block' and 'laboratory'						
算法	配准兴趣点		错误兴趣点		丢失兴趣点	
	积木	实验室	积木	实验室	积木	实验室
Harris	45	182	2	128	14	67
CSS	50	205	10	109	9	44
He&Yung	50	198	8	77	9	51
本文	54	198	2	32	5	51

采用 Mohammad 等人^[10]提出的平均重复率和定位误差的评价方法,通过在仿射变换和高斯噪声

情况下对4个检测器的检测性能的稳定性作比较从而评价本文算法的准确性性能。将兴趣点平均重复率定义为

$$R_{\text{arg}} \triangleq \frac{N_a}{2} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_t} \right) \quad (7)$$

式中, N_a 和 N_t 分别表示需要评价的检测器对原图像检测到的兴趣点数和图像做仿射变换后图像检测到的兴趣点。 N_a 为仿射变换后图像检测到的与参考兴趣点匹配的兴趣点数。

将定位误差 L_{error} 定义为重复兴趣点数间的距离均方根误差, 即

$$L_{\text{error}} = \sqrt{\frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} \|SD_i - \widehat{SD}_i\|_2^2} \quad (8)$$

式中, SD_i 、 $\widehat{SD}_i$ 分别为原图像和仿射变换后图像互相匹配的第 i 个兴趣点。

为了得到较好的性能评价曲线, 参考文献[15]选取了20幅图像进行仿真实验, 图像如图6所示。



图6 验证兴趣点性能的20幅图像

Fig. 6 Verify the interest point performance by 20 pictures

实验对每幅图分别进行以下4种变换检测匹配兴趣点的重复率和定位误差:

1) 在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 区间上, 每隔 10° 进行一次旋转变换;

2) 在 X 和 Y 方向上, 在 $[0.5, 2]$ 、 $[0.5, 2]$ 区间上以一致的尺度进行放大和缩小变换;

3) 在 X 和 Y 方向上, 在 $[0.7, 1.5]$ 、 $[0.5, 1.8]$ 区间上以非一致的尺度进行放大或缩小变换;

4) 在零均值高斯白噪声下, 在 $[1, 15]$ 区间上以1为步长均匀取值。

图7—图14即为4种实验环境下4种检测器对兴趣点检测的平均重复率和定位误差曲线图。

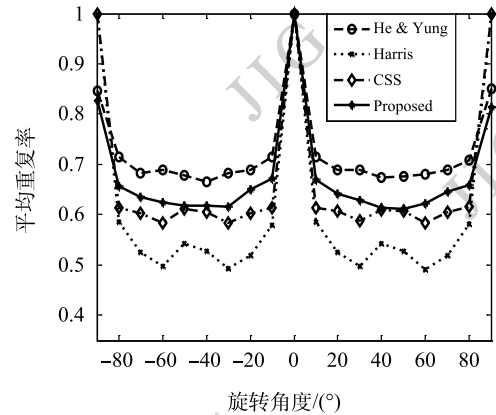


图7 旋转变换兴趣点平均重复率曲线图

Fig. 7 Average repeatability of rotation interest point curve graph

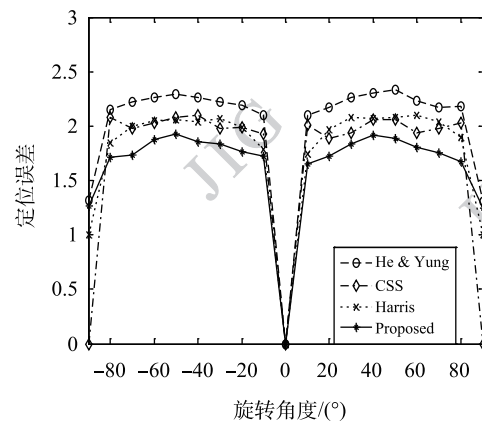


图8 旋转变换兴趣点定位误差曲线图

Fig. 8 Localization error of rotation interest point curve graph

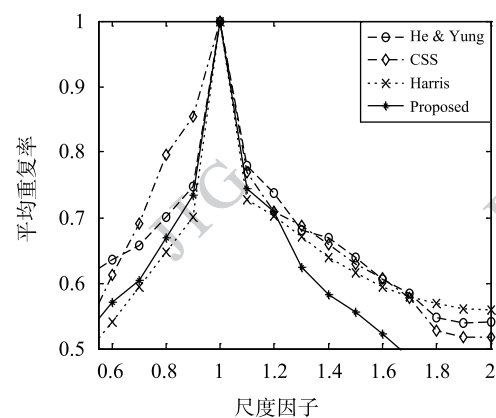


图9 一致性变换兴趣点平均重复率曲线图

Fig. 9 Average repeatability of uniform scaling interest point curve graph

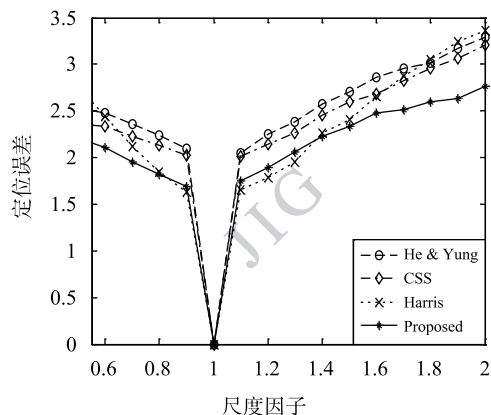


图 10 一致性变换兴趣点定位误差曲线图

Fig. 10 Localization error of uniform scaling interest point

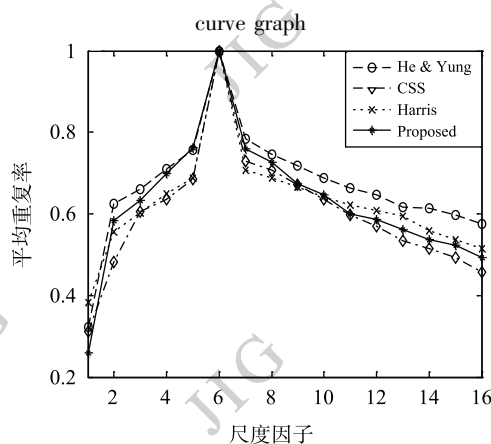


图 11 非一致性变换兴趣点平均重复率曲线图

Fig. 11 Average repeatability of non-uniform scaling Interest point curve graph

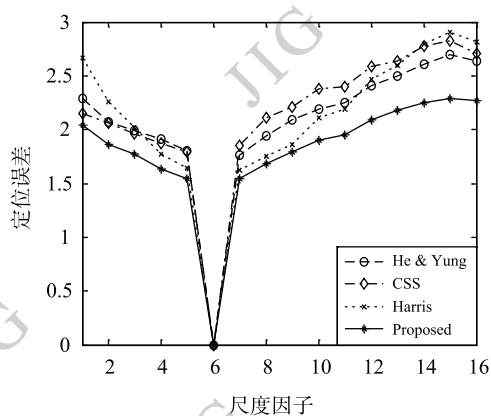


图 12 非一致性变换兴趣点定位误差曲线图

Fig. 12 Localization error of non-uniform scaling interest point curve graph

从图 7 可以看出, Harris 检测算法在旋转变化下的平均重复率较其他 3 种算法而言最差, 原因很简单: 与基于灰度信息的 Harris 检测算法不同, 其他 3 个基于边缘轮廓线检测的边缘提取很大程度上

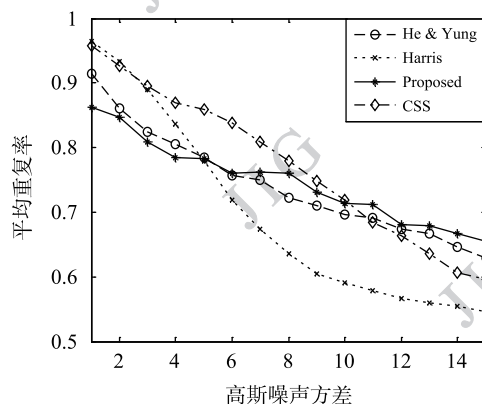


图 13 高斯噪声下兴趣点平均重复率曲线图

Fig. 13 Average repeatability of gaussian noise interest point

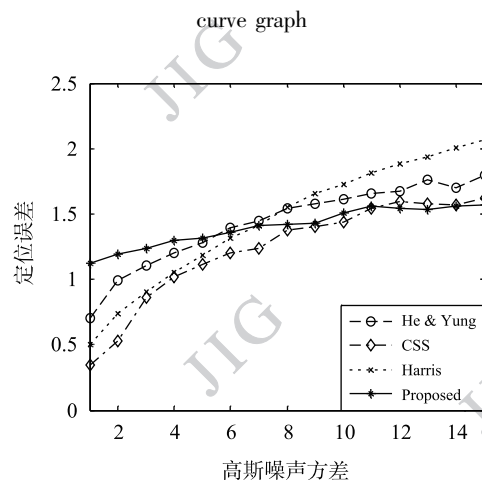


图 14 高斯噪声下兴趣点定位误差曲线图

Fig. 14 Localization error of gaussian noise interest point curve graph

降低了错误兴趣点的检测; 而本文算法比 He&Yung 的兴趣点检测算法在旋转变换兴趣点平均重复率略低, 但在旋转变换后的定位误差上 (图 8) 本文算法定位误差最小而 He & Yung 的定位误差最大; 图 9 中在一致尺度变换下兴趣点平均重复率本文算法比 He & Yung 和 CSS 算子略低, 图 11 中低于 He&Yung 算子, 高于 CSS 和 Harris 算子, 但从图 10、图 12 看出, 在一致尺度变换和非一致尺度变换下本文算法的定位误差明显高于 He&Yung、Harris、CSS 检测算法; 在高斯白噪声下, 从图 13 可以看出, 4 种算法的鲁棒性随噪声方差的增加而降低, 本文算法较其他 3 种算法有更强的噪声稳健性, 并且从图 14 可看出, 本文算法随着噪声方差不断增加, 定位误差变化却不明显, 说明本文算法在对噪声抑制方面有较好的兴趣点检测性能。

综上所述, 本文新兴趣点检测算法在 4 种变换

情况下,综合性能最佳,定位误差最小,并且在高斯白噪声环境下具有更好的兴趣点数重复率和更稳健的检测性能。

由以上实验结果可得出,4种检测算法在兴趣点平均重复率、定位准确性和噪声鲁棒性上都是各有不同的。表2为4个检测器在4种变换环境下的性能指标的排名,Harris的性能指标平均值为3.25,CSS的性能指标平均值为2.5,He & Yung的性能指标平均值为2.625,本文算法的性能指标1.625。综合4个方面性能的比较,可得出利用了第二小方向导数信息熵的兴趣点测度更优于其他3种兴趣点测度,He&Yung和CSS算子检测性能次之,Harris算子的检测性能最差。

表2 4种检测器性能指标排名

Table 2 Performance index of four detection methods

变换	指标	算法			
		Harris	CSS	He&Yung	Proposed
旋转变换	平均重复率	4	3	1	2
	定位误差	3	3	4	1
一致变换	平均重复率	4	1	2	3
	定位误差	2	3	4	1
非一致变换	平均重复率	3	4	2	1
	定位误差	2	4	3	1
高斯噪声	平均重复率	4	2	3	1
	定位误差	4	4	1	2
性能指标平均值		3.25	2.5	2.625	1.625

3 结 论

针对图像兴趣点检测过程中兴趣点平均重复率和噪声鲁棒性问题,本文提出在多方向 Gabor 虚部滤波器提取图像灰度变化信息得到像素点第二小方向导数响应,利用 Canny 边缘检测器提取边缘映射,并填补断裂边缘映射提取边缘轮廓线,最后求解图像边缘轮廓线及其邻域内像素点对应的第二小方向导数对应的信息熵归一化值作为新的兴趣点测度。在对多幅图像检测的实验结果表明,相对于经典的几种检测兴趣点算法,本文算法在兴趣点检测定位准确性和抑制噪声等方面具有更好的检测效果。

在实际应用上,兴趣点检测在图像匹配、目标跟

踪和3维模型建立等得到广泛应用。Lowe^[23]在2004年提出的SIFT算法中,也重点突出了关键点的检测与定位。为此可将本文提出的兴趣点检测算法作为其中的关键特征点,理论上可提高SIFT算法在图像匹配、目标跟踪中的检测准确性和噪声的鲁棒性。这也是接下来将研究的方向与重点。

参考文献 (References)

- [1] Cote M, Saeedi P. Automatic rooftop extraction in nadir aerial imagery of suburban regions using corners and variational level set evolution[J]. IEEE Transactions on Geo. Science and Remote Sensing, 2013, 51 (1): 313-328. [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2200689]
- [2] Lee H, Jeong S, Lee J. Robust detection system of illegal lane changes based on tracking of feature points[J]. Intelligent Transport Systems, 2013, 7 (1): 20-27. [DOI: 10.1049/iet_its.2011.0210]
- [3] Awrangjeb M, Lu G. An improved curvature scale-space corner detector and a robust corner matching approach for transformed image identification[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17 (12): 2425-2441 [DOI: 10.1109/TIP.2008.2006441]
- [4] Moravec H P. Towards automatic visual obstacle avoidance [C]//Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1977: 584-600.
- [5] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C]//Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester: University Manchester, 1988: 147-151.
- [6] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale and affine invariant interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 1 (60): 63-86. [DOI: 10.1023/B:VISI.0000027790.02288.f2]
- [7] Wu XL, Ding X, Meng F H, et al. Double threshold value Harris corner detection algorithm[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2013, 34 (4): 330-333. [吴学礼, 丁雪, 孟凡华, 等. 双阈值 Harris 兴趣点检测算法[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34 (4): 330-333.] [DOI: 10.7535/hbkd.2013yx04014]
- [8] Wang H, Zhou Z F, Cao J Z, et al. Corner detection via multi-scale auto-correlation matrix on edge contours[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36 (6): 1220-1224. [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兴趣点检测算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (6): 1220-1224.] [DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2014.06.32]
- [9] Mokhtarian F, Mackworth A K. Scale-based description and recognition of planar curves and two-dimensional shapes [J]. IEEE

- Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(1):34-43.
- [10] Awrangjeb M, Lu G. Robust image corner detection based on the chord-to-point distance accumulation technique[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2008, 10(6): 1059-1072. [DOI: 10.1109/TMM.2008.2001384]
- [11] He X C, Yung N H C. Corner detector based on global and local curvature properties [J]. Optical Engineering, 2008, 47(5): 1-12. [DOI:10.1117/1.2931681]
- [12] Mokhtarian F, Suomela R. Robust image corner detection through curvature scale space[J]. IEEE Trans. on PAMI, 1998, 20(12): 1376-1381. [DOI:10.1109/34.735812]
- [13] Wang H Q, Tan G X, Qian X H et al. An adaptive corner detector based on curvature scale space[J]. Computing Technology and Automation, 2007, 26(2): 123-127. [汪华琴, 谈国新, 钱小红, 等. 一种基于曲率尺度空间的自适应兴趣点检测方法[J]. 计算技术与自动化, 2007, 26(2): 123-127.]
- [14] Qiu C, Qi J, Liu H. Corner detection using information entropy [J]. Journal of Computational Information Systems, 2015, 11(1): 217-227.
- [15] Shui P L, Zhang W C. Corner detection and classification using anisotropic directional derivative representations [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(8): 3204-3219. [DOI:10.1109/TIP.2013.2259834]
- [16] Zhang W C, Zhang Z, Zhao Q, et al. Corner detector via anisotropic Gaussian directional derivatives filter[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2014, 4(28): 491-495. [章为川, 张智, 赵强, 等. 基于各向异性高斯方向导数滤波器的角点检测[J]. 西安工程大学学报, 2014, 4(28): 491-495.]
- [17] Chen W P, Chen X L. Research on improving stability of weighted SUSAN corner detection algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 33(2): 53-57. [陈万培, 陈晓龙. 加权 SUSAN 兴趣点检测算法稳定性改进研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 33(2): 53-57.]
- [18] Zhang W C, Wang F P, Zhu L, et al. Corner detection using Gabor filters[J]. IET Image Processing, 2014, 8(11): 639-646. [DOI:10.1109/iet-ipr.2013.0641]
- [19] Sun D. Research on density based image processing algorithms and application [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1998. [孙达. 基于概率密度的图像处理算法的研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998.]
- [20] Kadir T, Brady M. Saliency, Scale and image description [J]. International Journal of Computer Vision, 2001, 45(2): 83-105. [DOI:10.1023/A:1012460413855]
- [21] Mehrotra R, Namuduri KR, Ranganathan N. Gabor filter-based edge detection[J]. Pattern Recognition, 1992, 25(12): 1479-1494. [DOI:10.1016/0031-3203(92)90121-X]
- [22] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on PAMI, 1986, 8(6): 679-698. [DOI:10.1109/TPAMI.1986.4767851]
- [23] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 2(60): 91-110 [DOI:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94]