

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **10**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年10月 第17卷 第10期(总第198期)

目次

综述

张量值图像插值方法综述 邵宇, 刘莹, 孙富春(1197)

图像处理和编码

利用模运算及其周期性特点的安全隐写算法 廖琪男(1206)

结合快速融合与颜色传递的双波段夜视图像染色 李郁峰, 冯晓云, 徐铭蔚, 黄文丽(1213)

Weber 定律下尺度空间的自适应构建 刘立, 张瑞军, 万亚平, 黄欣阳, 彭复员(1222)

改进权值函数的非局部均值去噪算法 单建华(1227)

图像分析和识别

非相相似度保持投影 陈才扣, 侯钰(1232)

非正交二值子空间模板表示的并行生成 杨培, 武港山, 杨扬, 任桐炜(1237)

Adaboost 和随机图划分的无监督图像分类 李巍, 杨素锦, 段晓华(1245)

aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测 陈炳文, 王文伟, 秦前清(1252)

韦伯-中心环绕结构的图像显著性检测模型 林丽莉, 周文晖(1261)

气象传真图信息提取 李存东, 肖传毅, 潘海朗, 陈日清, 杨劲松(1268)

图像理解和计算机视觉

多要素空间场景相似性匹配模型及应用 宋腾义, 汪闽(1274)

计算机图形学

Delaunay 三角网通用合并算子及分治算法的简化 刘永和, 冯锦明, 郭维栋, 田根, 金毅(1283)

基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 的三角网格一致性分割 马亚奇, 李忠科, 赵静(1292)
 断裂面匹配的破碎刚体复原 李群辉, 周明全, 耿国华(1298)

虚拟现实与增强现实

核爆炸外观景象实时模拟 郑涛, 徐晓刚, 邵承永(1305)

医学图像处理

全局脑白质纤维群智能跟踪算法 冯远静, 王哲进, 张贵军, 俞立(1312)

遥感图像处理

对偶四元数线阵遥感影像几何定位 盛庆红, 姬亭, 刘微微, 王惠南(1319)

修正安装矩阵提高 FY-3B/MERSI 的地理定位精度 吴荣华, 杨忠东, 关敏, 李翔翔(1327)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 10 期

2012 年 10 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
 中国图象图形学学会
 北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
 北京 9718 信箱 邮编 100101
 电子信箱:jig@irsa.ac.cn
 电话:010-64807995 010-82614429
 网 址:www.cjig.cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
 (中国国际书店)
 (北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
 CAS China Society of Image and Graphics
 Institute of Applied Physics and Computational
 Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
 of Journal of Image and Graphics
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
 E-mail:jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
 and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 10 October 2012

Contents

Review

Overview of tensor valued images interpolation technology Shao Yu, Liu Ying, Sun Fuchun (1197)

Image Processing and Coding

Secure steganography based on modulo and its cyclical characteristic Liao Qinan (1206)

Night vision dual-band images coloration using fast fusion and color transfer
..... Li Yufeng, Feng Xiaoyun, Xu Mingwei, Huang Wenli (1213)

Adaptive algorithm of scale-space construction method based on Weber's law
..... Liu Li, Zhang Ruijun, Wan Yaping, Huang Xinyang, Peng Fuyuan (1222)

Non-local means denoising algorithm with enhanced weight function Shan Jianhua (1227)

Image Analysis and Recognition

Dissimilarity preserving projection Chen Caikou, Hou Yu (1232)

Parallel algorithm for generating template representation based on non-orthogonal binary subspace
..... Yang Pei, Wu Gangshan, Yang Yang, Ren Tongwei (1237)

Unsupervised image categorization based on Adaboost and stochastic graph partition Li Wei, Yang Sujin, Duan Xiaohua (1245)

Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet
..... Chen Bingwen, Wang Wenwei, Qin Qianqing (1252)

Image saliency detection model with Weber's law based on center-surround structure Lin Lili, Zhou Wenhui (1261)

Information extraction from meteorological facsimile maps
..... Li Cundong, Xiao Chuanyi, Pan Hailang, Chen Riqing, Yang Jinsong (1268)

Image Understanding and Computer Vision

Multi-feature based spatial scene matching model and its application Song Tengyi, Wang Min (1274)

Computer Graphics

Merging planar Delaunay triangulations based on universal operators and the implementation of a divide-conquer algorithm
..... Liu Yonghe, Feng Jinming, Guo Weidong, Tian Gen, Jin Yi (1283)

Consistence segmentation of triangle mesh using Laplace spectral embedding and Mean Shift
..... Ma Yaqi, Li Zhongke, Zhao Jing (1292)

Reassembly of broken 3D solids based on fractured surfaces matching Li Qunhui, Zhou Mingquan, Geng Guohua (1298)

Virtual Reality and Augmented Reality

Real-time simulation of nuclear explosion scene Zheng Tao, Xu Xiaogang, Shao Chengyong (1305)

Medical Image Processing

Global white matter tractography using swarm optimization Feng Yuanjing, Wang Zhejin, Zhang Guijun, Yu Li (1312)

Remote Sensing Image Processing

Geo-positioning line-array CCD images with dual quaternion Sheng Qinghong, Ji Ting, Liu Weiwei, Wang Huinan (1319)

Improved FY-3B/MERSI geolocation accuracy using installation matrix
..... Wu Ronghua, Yang Zhongdong, Guan Min, Li Xiangxiang (1327)

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)10-1222-05

论文引用格式: 刘立,张瑞军,万亚平,黄欣阳,彭复员. Weber定律下尺度空间的自适应构建[J]. 中国图象图形学报,2012,17(10):1222-1226.

Weber 定律下尺度空间的自适应构建

刘立^{1,2}, 张瑞军¹, 万亚平¹, 黄欣阳¹, 彭复员²

1. 南华大学计算机科学与技术学院, 衡阳 421001; 2. 华中科技大学电信系, 武汉 430076

摘要: 在 Weber 定律的启发下提出一种基于“恰可识别差异”的尺度空间自适应构建方法。Weber 定律认为人类感知模式不仅与刺激的变化有关,而且与原刺激强度有关。基于此观点,在图像尺度空间的构建过程中,首先以 Marr 视觉理论的屋脊型边缘和阶梯型边缘的特征之和计算图像的信息量,再通过实验获得人类视觉能感知到“恰可识别差异”时的图像信息量变化,最后通过曲线拟合自适应构建图像的尺度空间。实验结果表明,该方法充分体现了人类视觉感知特性,与其他尺度空间构建方法相比,在目标匹配实验中,匹配数目提升了 25% 以上;在去噪实验中,本算法的去噪效果良好。

关键词: 尺度空间;信息量;视觉感知;恰可识别差异(JND)

Adaptive algorithm of scale-space construction method based on Weber's law

Liu Li^{1,2}, Zhang Ruijun¹, Wan Yaping¹, Huang Xinyang¹, Peng Fuyuan²

1. Department of Computer Science and Technology, NanHua University, Hengyang 421001, China;

2. Department of Telecommunication, HuaZhong Science and Technology University, Wuhan 430076, China

Abstract: Inspired by Weber's Law, we propose an adaptive method to build up scale-space based on “just noticeable difference”. This is because human perception of patterns depend not only on the change of a stimulus but also on the original intensity of the stimulus. According to this point of view, we use the ramp edge and step edge to calculate the image information amount based on Marr's theory. The information lost between the adjacent scale layers is then gained in experiments when the human vision can feel the “just noticeable difference”. Finally, the scale-space is constructed adaptively by curve fitting method. The experimental results show that the algorithm can exhibit the characteristics of human visual perception. In the matching experiments, the number of matched points can be increased at least by 25% by the adaptive algorithm and it impressively outperforms the other scale-space construction method in denoising field.

Key words: scale-space; information amount; visual perception; just noticeable difference (JND)

0 引言

近年来,尺度空间概念以及建立在尺度空间基础上的尺度不变算子引起学者的广泛关注。Lindeberg 证明了在多种合理假设前提下,唯一可能的尺

度空间核是 Gaussian 核^[1-2]并进一步阐述了尺度空间的独特性质,奠定了尺度空间基本理论框架。在 Lindeberg 研究基础上 Lowe 等人提出的 SIFT(scale invariant feature transform)算法^[3]被认为是综合性能最好的尺度不变特征提取算子^[4]。许多学者针对 SIFT 算子本身的问题提出了一系列的提升算法,如

收稿日期:2011-12-20;修回日期:2012-05-03

基金项目:国家自然科学基金项目(60475024,60872076);航天技术创新基金项目(2006AA09Z203);湖南省科技计划基金项目(2010GK3012)

第一作者简介:刘立(1971—),男,副教授,湖南省青年骨干教师,2008年于华中科技大学获信号与信息处理专业博士学位,主要研究方向为数字图像处理、计算机视觉。E-mail:ll710915@yahoo.com.cn

PCA-SIFT^[5], SURF^[6], ASIFT^[7], SSIFT^[8], 这些算子都是以尺度空间为基础来实现尺度不变特性的。尺度空间的尺度参数如何设定是一个关键问题,上述算法均依经验采用指数递增方式,也有的文献采用等间隔增长方式^[9-10],可见尺度空间的构建缺乏统一的标准。这种采用经验值的方式会使得某些层因尺度参数变化过小造成过多的细节冗余影响时间复杂度,或因尺度参数变化过大使细节丢失过多,影响尺度空间构建效果。针对这类问题,刘立、李桂香等人提出了一种基于递归方式的尺度参数自适应算法^[11-13],但是算法时间复杂度过高,而且没有考虑到人类感知特性,使得实际效果并不理想,采用 Weber 定律可以很好地解决这个问题。Weber 定律认为人类感知模式不仅与刺激的变化有关,而且与原刺激强度有关。据此 Chen 等人提出了一种基于 Weber 定律的局部算子 WLD (weber local descriptor)^[14-15]并在人脸识别领域获得了很好的效果。葛书等人通过实验得到图像清晰度的“恰可识别差异”大约为 $\sigma = 0.5$,并得出结论:图像内容对图像清晰度的恰可识别差异没有显著影响^[16]。

以 Weber 定律为基础,采用“恰可识别差异”来决定人类视觉在尺度变化时能感觉的最小信息量变化。以此为分层标准,结合曲线拟合的方法,实现尺度空间自适应构建,为后续图像处理提供理论基础。

1 本文算法

本文自适应算法是建立在图像信息量“恰可识别差异”(JND)的基础上,主要步骤如下:1)基于 Marr 视觉理论获得图像信息量的度量量以及图像的信息量-尺度分布曲线;2)以 Weber 定律为基础,通过实验获得人类视觉“恰可识别差异时”的信息量变化值;3)通过曲线拟合实现尺度空间自适应构建。

1.1 基于视觉特征的信息度量

借鉴文献^[17]的结论来度量图像的信息量,即定义在尺度 σ 下的离散图像信息量为 Marr 视觉理论中定义的两类特征点的和。其中第 1 类点对应屋脊型边缘的特征,第 2 类对应阶梯型边缘的特征。由于人的视觉对这两类特征点比较敏感,因此它们可构成图像信息的主要内容。

设 $P_{m,n}$ 表示图像 P 的第 (m,n) 个像素的像素

值, $\phi_1(P)$ 表示第 1 类特征点集合, $\phi_2(P)$ 表示第 2 类特征点集合,则

$$\begin{aligned} \phi_1(P) = \{ & (m,n) : 1 < m < M, 1 < n < N; \\ & (P_{m,n} - P_{m-1,n})(P_{m,n} - P_{m+1,n}) > 0; \\ & (P_{m,n} - P_{m,n-1})(P_{m,n} - P_{m,n+1}) > 0; \\ & (P_{m,n} - P_{m-1,n-1})(P_{m,n} - P_{m+1,n+1}) > 0; \\ & (P_{m,n} - P_{m+1,n-1})(P_{m,n} - P_{m-1,n+1}) > 0 \} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \phi_2(P) = \{ & (m,n) : 2 < m < M-1, 2 < n < N-1; \\ & ((P_{m+1,n} - P_{m-1,n}) - (P_{m+2,n} - P_{m,n}))((P_{m+1,n} - \\ & P_{m-1,n}) - (P_{m,n} - P_{m-2,n})) > 0; \\ & ((P_{m,n+1} - P_{m,n-1}) - (P_{m,n+2} - P_{m,n}))((P_{m,n+1} - \\ & P_{m,n-1}) - (P_{m,n} - P_{m,n-2})) > 0; \\ & ((P_{m+1,n+1} - P_{m-1,n-1}) - (P_{m+2,n+2} - P_{m,n})) \times \\ & ((P_{m+1,n+1} - P_{m-1,n-1}) - (P_{m,n} - P_{m-2,n-2})) > 0; \\ & ((P_{m+1,n-1} - P_{m-1,n+1}) - (P_{m+2,n-2} - P_{m,n})) \times \\ & ((P_{m+1,n-1} - P_{m-1,n+1}) - (P_{m,n} - P_{m-2,n+2})) > 0 \} \end{aligned} \quad (2)$$

图像 $P_{m,n}$ 的信息量为

$$I_p = |\phi_1(P)| + |\phi_2(P)| \quad (3)$$

在尺度空间里,随着尺度的增加,图像的细节部分也丢失得更多,可以根据式(1)~(3)绘制尺度-信息量曲线来观察变化规律,即 $\sigma-I_p$ 曲线,图 1 是 Lena 图像的 $\sigma-I_p$ 曲线图。

图 1 中曲线显示,随着尺度参数的增加,视觉信息量先是平缓的变化,然后是比较明显的减少,最后又趋于平缓。

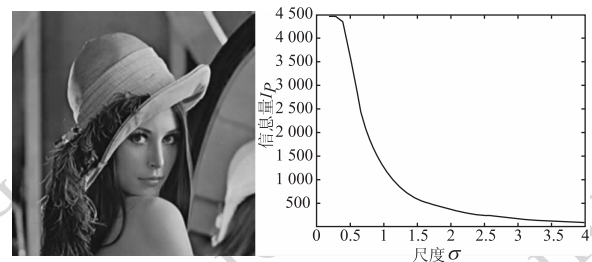


图 1 Lena 图像以及 $\sigma-I_p$ 曲线

Fig. 1 Lena image and $\sigma-I_p$ curve

1.2 Weber 定律与人类视觉感知特性

以相邻尺度间的图像信息量减少等于恒定值为原则建立尺度空间,这个恒定值采用 Weber 定律中的“恰可识别差异”来决定。Weber 定律是实验生理学家 Weber 在 1831 年研究人类能感受的最小刺激变化时提出的理论。Weber 最初对置于手掌中的

物体重量增减而发现了该定律,该定律对于其他感觉也适用。定律形式为

$$\Delta I/I = k \tag{4}$$

式中, I 表示某一物理量的初始值, ΔI 为该物理量的“恰可识别差异”, k 为常数。Weber 定律的物理意义可简单表述为, JND 与物理量的初始值成正比, 即物理量初值越大, JND 越大。将 Weber 定律应用于人类对图像信息量的感知, 把 20 名学生分为两组, 分别对 10 幅图进行不同尺度下的高斯平滑, 记录每位学生视觉恰能感觉到图像变模糊时的信息量变化值, 设 I_p 为图像原信息量, ΔI_{p1} 为第 1 组学生恰能感觉到图像变模糊时的信息量变化值, ΔI_{p2} 为第 2 组学生恰能感觉到图像变模糊时的信息量变化值, 则对这两组数据取平均后与原信息量的比为

$$(\Delta I_{p1} + \Delta I_{p2})/2I_p = \varepsilon \tag{5}$$

本文算法的中心思想就是在尺度分解过程中保持层间的信息量变化相对值等于 ε 。

1.3 自适应算法

图 2 为自适应算法流程图, 算法实现步骤如下:

- 1) 采用一系列的等间隔尺度对原图像进行平滑滤波, 获得多尺度图像系列;
- 2) 测得每幅高斯图像的信息量 I_p ;
- 3) 获得 $\sigma-I_p$ 曲线;
- 4) 通过实验得到 JND 信息量变化值 ΔI_p , 计算 $\varepsilon = \Delta I_p/I_p$;
- 5) 通过拟合的曲线获得均匀变化的信息量相对变化量为 ε 时的尺度值 σ' ;
- 6) 根据 σ' 建立信息量均匀变化的高斯尺度空间。

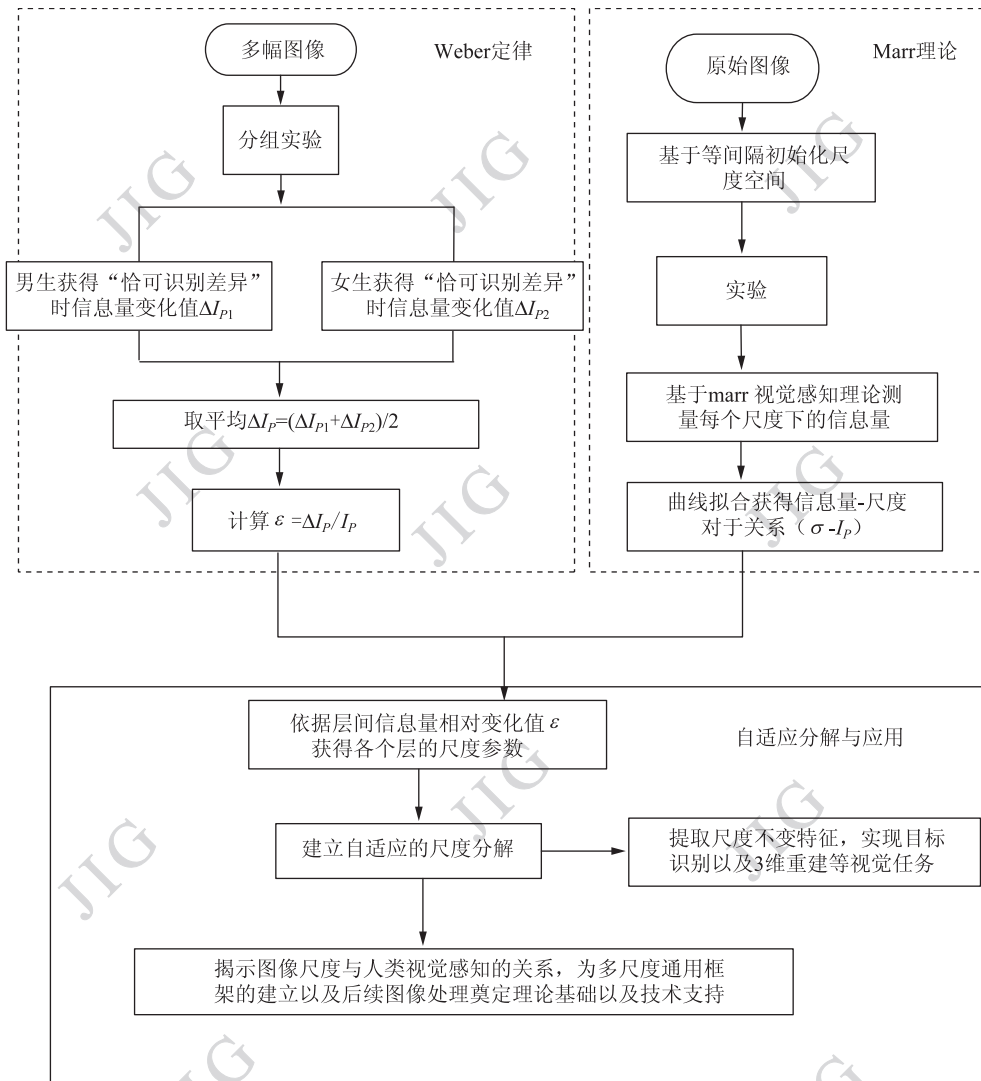


图 2 自适应算法流程图

Fig. 2 Adaptive algorithm flow chart

2 实验结果及分析

2.1 分组实验获得的“恰可识别差异”

实验将 20 名同学分为男生和女生两组,分别对 10 幅图像的不同程度高斯平滑进行辨别,记下刚能分辨图像清晰度有变化时的尺度和信息量 I_p' , 相对统计量为 $\Delta I_p/I_p$, 即 JND 为信息量的变化与信息总量的比值。表 1 为 Lena 图像的实验结果。

表 1 Lena 图像的分组实验结果

Table 1 The experiment results of Lena image

分组	原图信息量	平滑后信息量	$\varepsilon/\%$	平均
1(男生)	4471	4213	5.77	5.38%
2(女生)	4471	4248	4.99	

从表 1 还可以看出,女生的视觉比男生相对灵敏。

2.2 不同算法下尺度空间的高斯差图像比较

为了观察高斯尺度图像的信息量变化情况,相邻层的高斯图像相减得到高斯差图像,图 3 分别是尺度等间隔、尺度指数增长以及本文算法下 Lena 图像的高斯差图像。

从图 3 可以看出,本文算法下 Lena 图像的细节随尺度变化均匀递减。

2.3 图像匹配实验

本文自适应算法基于视觉感知信息量的均匀变化,因此细节信息能在不同尺度上得到充分展示,避

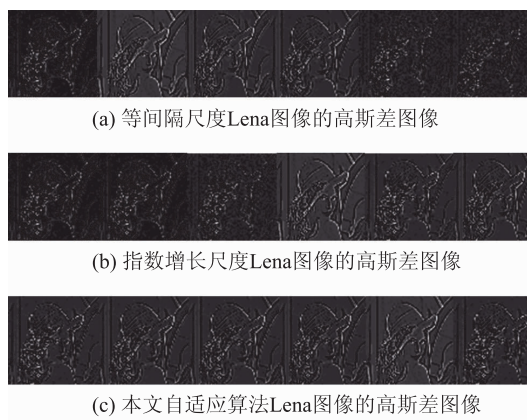


图 3 Lena 高斯差图像

Fig. 3 The dog image of Lena image

免了因盲目分层而导致特征点冗余或过少的问题,图 4 是在不同的高斯尺度空间算法基础上 SIFT 匹配效果,可以看出本文算法的匹配数量有一定的增加。

2.4 图像去噪实验

由于图像在进行尺度分解过程中可以将每个尺度的细节信息展示出来,因此噪声作为高频信息体现在不同的尺度中,通过丢弃噪声集中的尺度图像可以实现图像的去噪。

假设原图为 $I(x, y)$, $L(x, y, \sigma)$ 是采用尺度为 σ 的高斯平滑图像, $D(x, y, \sigma)$ 是高斯差图像,代表层之间信息的丢失,则

$$I(x, y) = L_n(x, y, \sigma_n) + D_1(x, y, \sigma_1) + D_2(x, y, \sigma_2) + \dots + D_n(x, y, \sigma_n) \quad (6)$$

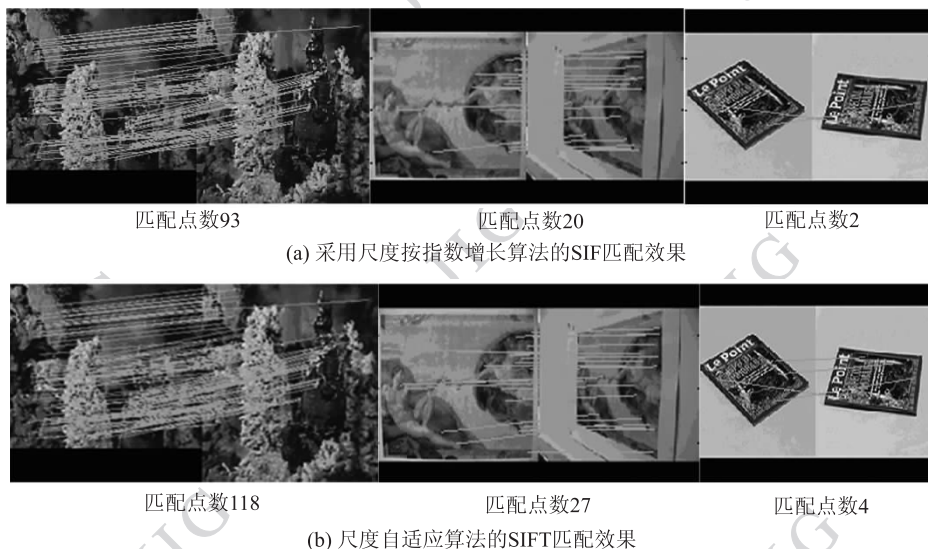


图 4 不同算法基础上 SIFT 匹配效果

Fig. 4 The SIFT matching results of different algorithm

式中, $L_n(x, y, \sigma_n)$ 是最后一层的平滑图像。

由式(6), 丢弃某些噪声集中的 $D_i(x, y, \sigma_i)$, 得到 $I'(x, y)$ 近似表示原图像, 实现图像的去噪。由于按指数增长等尺度空间分解过程中不能充分地将有用的细节信息与噪声分开, 有可能在去噪的同时丢失过多有用信息或者去噪不充分。

实验结果(图 5)显示本文算法去噪效果明显。

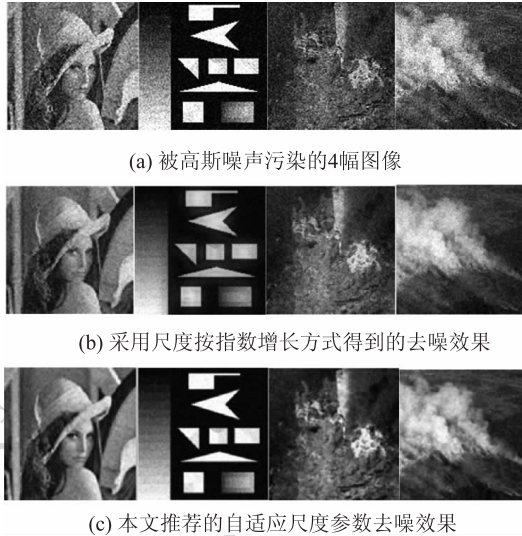


图 5 去噪效果比较

Fig. 5 The results of denoise

3 结 论

以视觉感知的信息度量为基础, 提出了一种基于 Weber 定律的高斯尺度参数自适应算法, 并给出详细步骤与效果。与其他的方法比较结果表明本文自适应算法更加合理, 能在不同尺度下展示图像的细节信息, 同时, 在利用 SIFT 算子实现目标匹配以及去噪的过程中, 本文算法优于尺度按指数增长的算法。

参考文献 (References)

- [1] Lindeberg T. Scale-space for discrete signals[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(3): 234-254.
- [2] Lindeberg T. Scale-space theory: A basic tool for analyzing structures at different scales[J]. Journal of Applied Statistics, 1994, 21(2): 224-270.
- [3] Lowe D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [4] Mikolajczyk K, Schmid C. A Performance Evaluation of Local De-

scriptors[J]. IEEE Transactions on PAMI, 2005, 27(10): 1615-1630.

- [5] Re Y, Sukthankar R. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC, USA: IEEE, 2004: 506-513.
- [6] Bay H, Tuytelaars T, van Gool L. SURF: Speeded up robust features [C]//Proceedings of 2006 European Conference on Computer Vision. Graz, Austria: Springer, 2006: 404-417.
- [7] Morel J M, Yu G. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2): 1-31.
- [8] Liu L, Peng F Y, Zhao K, et al. Simplified SIFT algorithm for fast image matching [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 181-184. [刘立, 彭复员, 赵坤, 等. 采用简化 SIFT 算法实现快速图像匹配[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 181-184.]
- [9] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale and affine invariant interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1): 63-86.
- [10] Dufournaud Y, Schmid C, Horaud R. Matching images with different resolutions [C]//Proceedings of 2000 computer vision and pattern recognition. South Carolina, USA: IEEE, 2000: 612-618.
- [11] Liu L, Peng F Y, Tian Y, et al. An adaptive algorithm of scale parameter based on Gaussian scale-space [J]. Chinese high technology letters, 2009, 19(1): 50-55. [刘立, 彭复员, 田岩, 等. 基于高斯尺度空间的尺度参数自适应研究 [J]. 高技术通讯, 2009, 19(1): 50-55.]
- [12] Liu L. Research on image and object location based on multi-scale feature [D]. Wuhan: HuaZhong University of Science and technology, 2008. [刘立. 基于多尺度特征的图像匹配与目标定位研究 [D]. 武汉, 华中科技大学, 2008.]
- [13] Li G X, Liu L. Adaptive algorithm of Gaussian scale parameter [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(14): 169-172. [李桂香, 刘立. 高斯尺度参数自适应算法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(14): 169-172.]
- [14] Chen J, Shan S G, He C, et al. WLD: A Robust Local Image Descriptor [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(9): 1705-1720.
- [15] Chen J, Shan S G, Zhao G Y, et al. A robust descriptor based on Weber's Law [C]//Proceedings of IEEE Computer Society International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, Alaska, USA: IEEE, 2008: 1-7.
- [16] Ge S, Yin H C, Xia J, et al. The Just-Noticeable-Difference of Natural Image Definition [J]. Advanced display, 2007, 78(8): 38-42. [葛书, 尹涵春, 夏军, 等. 自然图像清晰度的恰可识别差异 [J]. 现代显示, 2007, 78(8): 38-42.]
- [17] Wang Z Y, Cheng Z X, Tang S J. Information measures of scale-space based on visual characters [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(7): 922-928. [王郑耀, 程正兴, 汤少杰. 基于视觉特征的尺度空间信息量度量 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(7): 922-928.]