

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012
Vol.17 No.

4

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4月 第17卷 第4期(总第192期)

目次

综述

图像分割中的模糊聚类方法 李旭超, 刘海宽, 王飞, 白春艳(447)

图像处理和编码

GPU 辅助的希尔伯特变换轮廓术 周波, 赵小敏, 王东平(459)

引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复 李开宇, 孙玉刚(465)

自适应的有效非局部图像滤波 许光宇, 檀结庆, 钟金琴(471)

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁(480)

压缩感知在 Micro-CT 图像超分辨重建中的应用 王丽艳, 韦志辉, 罗守华, 顾宁(487)

对偶四元数单片空间后方交会算法 姬亭, 盛庆红, 王惠南, 刘微微(494)

利用运动强度判据的高效自适应运动估计算法 郭晓珉, 姚睿, 刘智跃, 王友仁(504)

图像分析和识别

核空间散度阈值法 吴成茂(512)

近邻自适应局部尺度的谱聚类算法 孔万增, 孙昌思核, 张建海, 胡三清, 杨灿(523)

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法 刘雅蓉, 汪西莉(530)

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤(537)

融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维(546)

图像理解和计算机视觉

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法 林丽莉, 周文晖(553)

篮球比赛视频中持球队员行为预测	王千,夏利民,谭论正(560)
利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度	朱新懿,耿国华,温超(568)

计算机图形学

图形处理器空间插值并行算法的实现	赵艳伟,程振林,董慧,方金云(575)
------------------------	---------------------

虚拟现实与增强现实

面向 GPU 的批 LOD 地形实时绘制	张兵强,张立民,张建廷(582)
----------------------------	------------------

遥感图像处理

光学遥感舰船目标识别方法	杜春,孙即祥,李智勇,滕书华(589)
自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪	杨萌,张弓(596)

第 18 届中国遥感大会征文通知	封 2
第 33 届亚洲遥感会议征文通知	封 2

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 4 期

2012 年 4 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:010-68407995 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

第 18 届中国遥感大会征文通知

“第 18 届中国遥感大会”将于 2012 年 10 月 19 日-23 日在武汉召开。本届会议由中国遥感委员会主办,中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会和武汉大学承办。会议将围绕“遥感—全方位的社会服务”这一宗旨,以遥感学界院士与知名专家的特邀报告,分会场专题技术交流与技术讲座,重点项目研讨汇报、技术展览,新技术与新产品发布,专业委员会理事会等多种形式开展,同时举行“第 7 届中国青年遥感辩论会”和“第 2 届全国高分辨率遥感数据处理与应用研讨会”。

会议将全方位地展示遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等方面的最新成果,为专家、学者和政府主管部门搭建联系纽带,为研发和用户提供技术交流平台,共同促进遥感科技的发展、遥感产业化的推进和大遥感体系的建立。

本届会议围绕大会主题将就遥感新理论、技术、方法和应用进行征文,范围包含但不限于以下方面:

- 1) 国家遥感中长期发展战略、国际遥感前沿与进展;
- 2) 航天、航空、低空、地面遥感技术及系统;
- 3) 光学、红外、高光谱及激光遥感技术;
- 4) 主、被动微波及雷达遥感技术;

- 5) 数字摄影测量与制图;
- 6) 高分辨率遥感数据处理与应用;
- 7) 地理空间数据处理技术与方法;
- 8) 地理国情监测(土地、农业、林业、矿产、环境、地质及水资源等);
- 9) 海洋、气象与全球变化;
- 10) 遥感、地理信息系统与导航定位系统(3S)集成与应用;
- 11) 智慧城市与数字地球;
- 12) 深空探测与行星测绘;
- 13) 教育、培训与社会公共事业。

征文采用在线方式投稿;

投稿要求:论文内容不涉密,且未在国内外学术刊物或正式学术会议上发表过;被录用的全文将收入大会论文集(送 ISTP 检索),并精选 70~90 篇口头报告论文编辑出版英文 SPIE 会议文集;大会将评选青年优秀论文(参加口头报告),论文将直接进入英文 SPIE 会议文集。

论文摘要截止日期为 2012 年 5 月 15 日,全文截稿日期为 2012 年 6 月 15 日。

会议相关信息,请查阅会议网址:<http://rsgis.whu.edu.cn/18ccrs/index.html>

“第 18 届中国遥感大会”组委会

第 33 届亚洲遥感会议征文通知

“第 33 届亚洲遥感会议”将由泰国地理信息和空间技术发展局(GISTDA)、科技部(MOST)和亚洲遥感协会(AARS)联合主办,于 2012 年 11 月 26-30 日,在泰国芭堤雅市宗滴恩酒店举行。这是亚洲遥感协会每年一届的系列学术会议。本届大会征文包括传感器与平台、算法和图像处理、GIS 与 Web GIS、全球导航卫星系统、灾害、自然资源、环境科学、教育和宣传、健康科学、制图、其他等方面。

会议重要日期:

- 论文摘要提交截止:2012 年 5 月 15 日;
 - 论文接收通知:2012 年 7 月 1 日;
 - 论文全文提交截止:2012 年 9 月 30 日;
 - 网上注册截止:2012 年 10 月 26 日;
 - 会议召开日期:2012 年 11 月 26-30 日。
- 会议还将组织学生专场和技术展览,其他信息请访问会议网站:<http://acrs2012.gistda.or.th>

与往年一样,中国遥感委员会仍将鼓励中国遥感科研人员和企事业单位参加会议,并组团参加学术交流和会议展览。

中国遥感委员会

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 4 April 2012

Contents

Review

The survey of fuzzy clustering method for image segmentation Li Xuchao, Liu Haikuan, Wang Fei, Bai Chunyan (447)

Image Processing and Coding

GPU assisted Hilbert transform profilometry Zhou Bo, Zhao Xiaomin, Wang Dongping (459)

Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor Li Kaiyu, Sun Yugang (465)

Adaptive efficient non-local image filtering Xu Guangyu, Tan Jieqing, Zhong Jinqin (471)

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image
..... Zhang Xudong, Shen Yuliang, Hu Liangmei, Chen Jingjing (480)

Image superreconstruction for Micro-CT based on compressed sensing Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua, Gu Ning (487)

Dual quaternion of space resection with single-image Ji Ting, Sheng Qinghong, Wang Huinan, Liu Weiwei (494)

Efficient adaptive motion estimation algorithm based on motion intensity Guo Xiaomin, Yao Rui, Liu Zhiyue, Wang Youren (504)

Image Analysis and Recognition

Divergence thresholding method in kernel space Wu Chengmao (512)

Spectral clustering based on neighboring adaptive local scale
..... Kong Wanzeng, Sun Changsihe, Zhang Jianhai, Hu Sanqing, Yang Can (523)

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space
..... Liu Yarong, Wang Xili (530)

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images
..... Qiu Xuan, Huang Jing, Yang Feng, Xing Dong, Tu Shengxian (537)

Coherent point drift registration combined with image feature and its application
..... Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei (546)

Image Understanding and Computer Vision

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation
..... Lin Lili, Zhou Wenhui (553)

Behavior prediction of ball carriers in basketball match videos Wang Qian, Xia Limin, Tan Lunzheng (560)

Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps
..... Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao (568)

Computer Graphics

Realization of GPU parallel spatial interpolation method
..... Zhao Yanwei, Cheng Zhenlin, Dong Hui, Fang Jinyun (575)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU-based real-time terrain rendering algorithm using batched LOD
..... Zhang Bingqiang, Zhang Limin, Zhang Jianting (582)

Remote Sensing Image Processing

Method for ship recognition using optical remote sensing data
..... Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua (589)

SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary
..... Yang Meng, Zhang Gong (596)

中图法分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0480-07

论文引用格式: 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁. 改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 480-486

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法

张旭东¹, 沈玉亮¹, 胡良梅¹, 陈菁菁²

1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009; 2. 安徽农业大学信息与计算机学院, 合肥 230036

摘要: PMD (photonic mixer device) 相机是一款基于 TOF (time-of-flight) 技术的 3 维成像系统, 在获得 2 维灰度图像的基础上, 能够同时捕捉距离图像和幅度图像。但它的主要缺点是分辨率低, 并存在较大的随机噪声。针对此问题, 结合 PMD 相机幅度信息和双边滤波器的特点, 提出一种改进的非连续自适应马尔科夫随机场 (DAMRF) 模型的超分辨率重建方法, 该模型引入调制信号幅度 A 的平方作为可信度, 将其作为权值对传统 DAMRF 模型中能量函数的距离项进行自适应加权, 从而增加距离图像每个像素点在平滑过程中的权值。该方法不仅提高了距离图像的空间分辨率, 又能有效地对距离图像进行滤波去噪, 同时也增强了距离图像的边缘信息, 较好地保持了图像边缘的连续性。实验结果表明, 该方法的重建结果优于传统 DAMRF 模型的超分辨率方法, 获得重建图像的信噪比 (SNR) 和均方根误差 (RMSE) 都有较好的改善, 重建图像的视觉效果也得到一定的提高。

关键词: 超分辨率重建; PMD 相机; TOF 技术; 非连续自适应马尔科夫随机场模型; 可信度; 双边滤波器

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image

Zhang Xudong¹, Shen Yuliang¹, Hu Liangmei¹, Chen Jingjing²

1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Information and Computer, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

Abstract: A PMD (photonic mixer device) camera is a three-dimensional imaging system based on the TOF (time-of-flight) technology. While obtaining the two-dimensional gray image, this camera can capture a range image and an amplitude image at the same time. However, the main drawbacks of the camera are the low resolution and random noise. According to this problem, we combine the amplitude information of the PMD camera and a bilateral filter. An improved discontinuity adaptive Markov random field (DAMRF) model is introduced by a combination of super-resolution reconstruction methods, which introduces the square of the modulating signal amplitude A as confidence. Then this method will use it as the weight to carry on an adaptive weight for the distance items of the energy function of the traditional DAMRF model, so it increases the weights of the range image pixel in the process of smoothing. This method not only increases the spatial resolution of the range images, but also effectively filters and de-noises the range image. At the same time, it enhances the marginal information of the range image, and better maintains the continuity of the image edges. The experimental results demonstrate that the reconstruction result of this method is superior to that of the traditional DAMRF model. The method obtains a better improvement in the reconstructed image signal to noise ratio (SNR) and root mean square error (RMSE), and improves the visual effects of the reconstructed image.

Key words: super-resolution reconstruction; PMD camera; TOF technology; discontinuity adaptive Markov random field model; confidence; bilateral filter

收稿日期: 2011-07-04; 修回日期: 2011-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60875012, 60905005); 教育部博士点基金项目 (2009111110015); 安徽省自然科学基金项目 (11040606M149)

第一作者简介: 张旭东 (1966—), 男, 副教授, 2005 年于中国科学技术大学获模式识别与智能系统工程博士学位, 主要研究方向为智能信息处理、计算机视觉。E-mail: xudong1118@163.com

0 引言

在当今计算机视觉和多媒体等应用领域,目标到传感器的距离获取获得了很大的发展。激光距离扫描仪使用单激光设备对目标场景进行逐行采样,从而获得高质量的距离图像,但它的成本高,并且耗时,不适用于动态场景,目前使用范围很有限^[1]。然而,PMD (photonic mixer device) 相机采用基于 TOF (time-of-flight) 技术的连续光幅度调制的原理,

从而获得整个场景目标的距离图像和强度图像,能够很好地克服激光距离扫描仪的部分缺点。PMD 相机是一款主动式的 3 维成像系统,其基本工作原理如图 1 所示,光发射器向目标场景发射红外光信号,光束到达被测目标后发生反射,按原路返回的光被光探测器接收,根据光在整个测量过程中的传播时间和光速,可以求出相机到目标的距离。由于它的低成本、高速帧率和简捷性,被广泛应用于 3 维可视化、模式识别、计算机视觉和多媒体等领域^[2-4]。

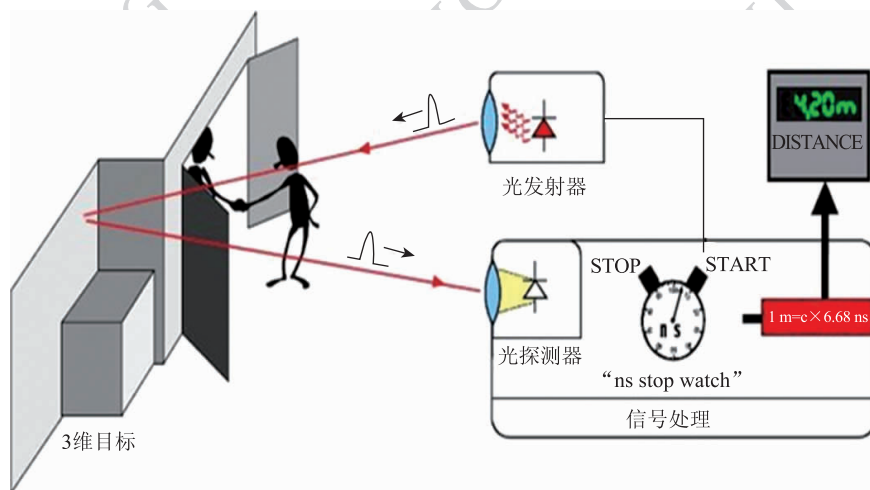


图1 PMD 相机测量的基本原理

Fig.1 The basic measuring principle of PMD camera

PMD 相机不仅可以实时地估计距离图像的每个像素距离值,并且能够同时获取强度图像和幅度图像,但它的主要缺点是分辨率低,并存在较大的随机噪声,这些缺陷限制了 PMD 相机的使用和推广。最近,研究者们对 PMD 距离图像分辨率的提高做了很多有意义的工作,Prasad 等人^[5]首先对距离图像进行插值,插值之后和高分辨率的 CCD (charge-coupled device) 图像进行配准操作,这种方法能够很好的平滑距离图像,同时却导致了图像边缘高频信息的丢失。Huhle 等人^[6]提出了基于 MRF (Markov random field) 模型的能量最小化框架的超分辨率方法,把低分辨率距离图像和高分辨率 CCD 图像进行融合,有效地保留了距离图像的边缘信息。Hahne 等人^[3]采用立体视觉算法对低分辨率距离图像进行融合,从而产生高分辨率 (HR) 的距离图像。Rajagopalan 等人^[7]采用了传统非连续自适应马尔科夫随机场 (DAMRF) 模型的超分辨率重建方法,对重建图像边缘的不连续具有一定抑制作用,重建图

像的空间分辨率和边缘信息改进的效果并不十分理想。本文在传统 DAMRF 模型方法的基础上,实现一种改进的 DAMRF 模型超分辨率重建方法,该方法不仅继承了双边滤波器的特点,而且结合了贝叶斯框架下的最大后验概率 (MAP) 估计理论,根据 PMD 相机幅度信息的特点,引入可信度 A^2 对传统 DAMRF 模型中的能量函数进行改进,从而有效地提高了距离图像的分辨率,对噪声具有较强的抑制效果,较好地保持了距离图像边缘的连续性。

1 传统 DAMRF 模型方法

超分辨率图像重建的退化模型可以表示为

$$y_k = DW_k F_k X + \eta_k \quad (1)$$

式中, y_k 是退化的第 k 帧图像, X 是高分辨率图像, D 和 W_k 分别是下采样矩阵和运动矩阵, F_k 为模糊矩阵, η_k 表示噪声。

设低分辨率图像为 Y , 其对应的高分辨率图像

为 \mathbf{X} 。超分辨率重建需要解决的问题是在已知 \mathbf{Y} 的条件下,求出 \mathbf{X} 的最优近似解,求解该问题的常用方法是最大后验概率法 (MAP)。在低分辨率距离图像条件下,MAP 估计可以表示为

$$\hat{x} = \arg \max_{\mathbf{X}} P(\mathbf{X} | \mathbf{Y}_1, \dots, \mathbf{Y}_N) \quad (2)$$

根据贝叶斯估计准则,式(2)可以改写为

$$\hat{x} = \arg \max_{\mathbf{X}} P(\mathbf{Y}_1 = \mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{Y}_N = \mathbf{y}_N | \mathbf{X} = \mathbf{x}) P(\mathbf{X} = \mathbf{x}) \quad (3)$$

式(1)中假设噪声为独立高斯白噪声,方差为 σ^2 ,得

$$P(\mathbf{Y}_1 = \mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{Y}_N = \mathbf{y}_N | \mathbf{X} = \mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N_1N_2}} \times \exp\left(-\sum_{k=1}^N \frac{\|\mathbf{y}_k - \mathbf{D}\mathbf{W}_k\mathbf{F}_k\mathbf{X}\|_2^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

根据 Markov 随机场模型,得到高分辨率距离图像的先验概率 $P(\mathbf{X} = \mathbf{x})$,由 MRF-Gibbs^[8] 之间的等价性, Gibbs 分布用来显式地描述 Markov 分布,即 \mathbf{X} 的先验概率可以表示为下面的形式

$$P(\mathbf{X} = \mathbf{x}) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{1}{T} \sum_{c \in C_X} V_c^x(\mathbf{x})\right) \quad (5)$$

能量函数采用了 Li^[9] 的形式

$$\begin{aligned} \sum_{c \in C_X} V_c^x(\mathbf{x}) = & \sum_{i=1}^{l_1} \sum_{j=1}^{l_2} 4\gamma - \\ & \gamma \exp\left\{-\frac{[x(i,j) - x(i,j-1)]^2}{\gamma}\right\} - \\ & \gamma \exp\left\{-\frac{[x(i,j) - x(i,j+1)]^2}{\gamma}\right\} - \\ & \gamma \exp\left\{-\frac{[x(i,j) - x(i-1,j)]^2}{\gamma}\right\} - \\ & \gamma \exp\left\{-\frac{[x(i,j) - x(i+1,j)]^2}{\gamma}\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, Z 是一个归一化常数, T 是温度参数, $V_c^x(\mathbf{x})$ 是连通团的势函数,势函数描述了一组邻近像素的相互作用,不同的势函数确定不同的 MRF 模型。由方程式(4)(5),可以重新把方程式(3)写为

$$\hat{x} = \arg \min_{\mathbf{X}} \left(\sum_{k=1}^N \|\mathbf{y}_k - \mathbf{D}\mathbf{W}_k\mathbf{F}_k\mathbf{X}\|_2^2 + \sum_{c \in C_X} V_c^x(\mathbf{x}) \right) \quad (7)$$

由于 DAMRF 模型先验分布的能量函数是非凸函数,求解目标函数的最优解时,容易陷入局部最小化问题,并不能获得重建图像的最优近似解。因此,采用文献[9-10]中使用的 GNC (graduated non-convexity) 优化算法对目标函数进行优化求解,从而获得重建结果的最优解。

2 改进的 DAMRF 模型

PMD 相机能够以视频帧速率实时地获得距离图像和幅度图像,距离图像通过发射信号和反射信号之间的相位偏移计算得到,幅度图像通过每个像素点位置的反射信号幅度信息得到。PMD 相机实际获得距离图像的像素距离值不一定十分准确,在真实距离与测量距离之间会产生偏差,这种偏差会影响距离测量的精度。根据 PMD 幅度图像信息和距离图像信息之间的关系,文献[11]给出了距离测量的偏差与调制信号的幅度关系为 $\sigma_d^2 \propto \left(\frac{1}{A^2}\right)$,把调制信号幅度 A 的平方作为可信度用来评价距离图像测量的精度以及用于对距离图像进行平滑操作,从而获得距离像素点的可靠性估计。

可信度 A^2 首先应用于对距离图像进行滤波去噪,对距离图像进行平滑滤波的最好方法是将其作为权值对距离图像进行平滑操作,从而决定了邻域内每个距离像素点平滑的程度,进而有效地增强了距离图像的边缘信息。文献[11]采用高斯模板对距离图像进行平滑滤波,在对距离图像像素点进行平滑滤波时,离中心像素点越近的距离像素点,其所占的权值越高,离中心像素点距离较大的像素点所占的权值越低,这样便可有效地对距离图像进行滤波去噪。

传统 DAMRF 模型的超分辨率图像重建方法,不能有效地对距离图像滤波去噪,距离图像的空间分辨率并不能得到较好的提高。针对传统 DAMRF 模型方法的缺点,本文结合 PMD 相机幅度信息和双边滤波器的特点,实现了一种改进的 DAMRF 模型的超分辨率重建方法。该方法根据双边滤波器是由一个空间项和距离项乘积的组成关系,确定了 DAMRF 模型中改进的能量函数,同时引入可信度 A^2 作为权值对 DAMRF 模型中能量函数的距离项进行自适应加权,用具有较高可信度的像素距离值代替具有较低可信度的距离像素值,能够有效地对距离图像进行平滑操作,从而增加每个距离像素点在平滑过程中的权值。当邻域内的像素点与中心点像素点的距离差值较大时,这个点位于图像的边缘,其在平滑过程中所占的权值也较低,从而有效地增强了距离图像的边缘信息,能够很好地保持图像的边缘连续。根据双边滤波器的 Retinex 理论^[12],引入

了新的惩罚函数,式(5)改写为

$$P[\mathbf{X} = \mathbf{x}] = \frac{1}{Z} \exp\left\{-\frac{1}{T}V(\mathbf{x})\right\} \quad (8)$$

因此,改进的 DAMRF 模型中的能量函数可以表示为

$$V(\mathbf{x}) = \sum_{c \in C} \sum_{a \in N_c} d(a, c) s(x_{a;i,j}, x_{c;p,q}) \quad (9)$$

式中, c 是邻域中心像素点, a 是中心像素点邻近的像素点, 即 $c = (p, q)$, $a = (i, j)$ 。空间项 $d(a, c)$ 描述的是距离像素点之间几何空间上的邻近关系, 距离项 $s(x_{a;i,j}, x_{c;p,q})$ 描述的是两个像素点光度上的相似性, 两项都可以用高斯函数来表示。如何选择 $d(a, c)$ 和 $s(x_{a;i,j}, x_{c;p,q})$ 是重建获得的距离图像质量改进的关键。空间项 $d(a, c)$ 可以表示为

$$d(a, c) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\|a - c\|}{\sigma_1}\right)^2\right\} \quad (10)$$

DAMRF 模型中能量函数的距离项 $s(x_{a;i,j}, x_{c;p,q})$ 采用文献[9]的自适应势函数形式, 该函数能够对相邻像素间的梯度影响进行自适应的调整, 从而有效地保留图像的边缘连续性, 改进的 $s(x_{a;i,j}, x_{c;p,q})$ 可以表示为

$$s(x_{a;i,j}, x_{c;p,q}) = \gamma - \gamma e^{-\|x_{a;i,j} - x_{c;p,q}\|^{2/\gamma}} \quad (11)$$

式中, $x_{a;i,j}$ 和 $x_{c;p,q}$ 是原始的距离图像分别经高斯平滑滤波得到的像素距离值^[11], $x_{a;i,j}$ 和 $x_{c;p,q}$ 可以表示为

$$x_{a;i,j} = \frac{1}{K_t} \sum_{k_i = -\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} \sum_{k_j = -\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} x_{i+k_i, j+k_j} \cdot f_{k_i, k_j} \cdot A_{i+k_i, j+k_j}^2 \quad (12)$$

$$K_t = \sum_{k_i = -\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} \sum_{k_j = -\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} f_{k_i, k_j} \cdot A_{i+k_i, j+k_j}^2 \quad (13)$$

$$x_{c;p,q} = \frac{1}{K_s} \sum_{k_p = -\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} \sum_{k_q = -\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} x_{p+k_p, q+k_q} \cdot f_{k_p, k_q} \cdot A_{p+k_p, q+k_q}^2 \quad (14)$$

$$K_s = \sum_{k_p = -\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} \sum_{k_q = -\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} f_{k_p, k_q} \cdot A_{p+k_p, q+k_q}^2 \quad (15)$$

式中, $f_{k_i, k_j} = f_{k_p, k_q} = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{2\sigma_2^2}\right)$, u, v 是中心像素点到邻域内其他像素点的距离, n 是高斯掩膜的大小, 并且必须为奇数。

根据式(2)中 MAP 估计, 结合式(3)(9)–(11), 可以得到下面的 DAMRF-MAP 表达式:

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \left\{ \sum_{k=1}^N \|y_k - DW_k F_k \mathbf{x}\|_2^2 + \lambda V(\mathbf{x}) \right\} \quad (16)$$

式中, $\lambda = \frac{\sigma^2}{T}$ 是正则化参数, 用来平衡正则项和数据项之间的逼近程度。

3 实验结果和分析

3.1 实验结果

实验中, 采用最新一代 TOF 相机 PMD [vision][®] CamCube 2.0 (如图 2 所示), 这款相机的分辨率可以达到 204×204 像素, 每秒钟能够获得 25 帧图像。实验利用 PMD 相机捕捉 4 幅低分辨率距离图像作为测试图像, 为了避免运动视差的影响, 通常选择连续帧或接近连续的序列作为测试图像。采用基于光流估计的图像配准方法对低分辨率的距离图像进行配准, 把获得的低分辨率距离图像之间的运动参数和初始的高分辨率图像应用于 GNC 的优化算法中, 进行迭代求解, 从而获得重建图像的最优近似解。实验是在 core i3 处理器、内存 1G 的 PC 机上进行, 通过 MatlabR2008a 仿真实现。



图2 PMD[®] Camcube 2.0 相机

Fig. 2 PMD[®] Camcube 2.0 camera

为了验证本文方法的有效性, 采用信噪比 (SNR) 和均方根误差 (RMSE) 作为重建性能的评价指标, 表示形式为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)}\|^2}{\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|^2} \quad (17)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|^2}{M \times N}} \quad (18)$$

式中, $\mathbf{x}^{(0)}$ 是超分辨率图像的初始估计, 通过对低分辨率图像进行双线性插值得到; $\hat{\mathbf{x}}$ 为重建后的高分辨率距离图像; \mathbf{x} 表示参考高分辨率距离图像, 通过自适应正则化的超分辨率方法得到; M, N 为参考距离

图像的行数和列数。

实验 1 为了比较不同的超分辨率方法对低分辨率距离图像的重建效果,本文利用彩色相机拍摄场景图像,同时利用 PMD 相机捕捉连续的 4 幅低分辨率距离图像作为测试图像,4 幅连续的低分辨率距离图像之间存在亚像素位移,其运动位移参数如表 1 所示。初始的高分辨率图像估计通过对低分辨率距离图像进行双线性插值获得,实验过程中正则化参数值选择为 0.01。重建的性能评价结果如表 2 所示。重建结果如图 3 所示,图中坐标表示距离图像的像素坐标,图中椭圆形线框中所示的 H、I 作为选取的研究目标。

表 1 距离图像的运动参数

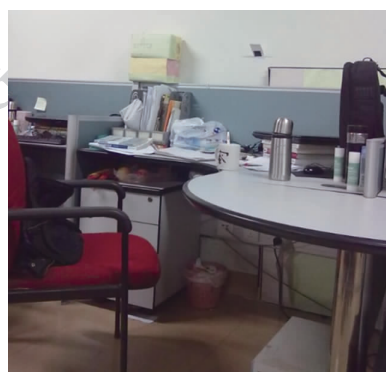
Table 1 The motion parameters of range image

距离图像	X 方向平移	Y 方向平移
测试图像 1	0	0
测试图像 2	0.247 5	-0.126 8
测试图像 3	0.266 5	-0.108 9
测试图像 4	0.216 4	-0.094 8

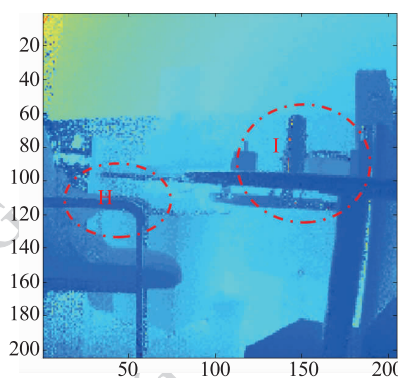
表 2 距离图像重建结果的性能指标比较

Table 2 The performance index comparison of range image

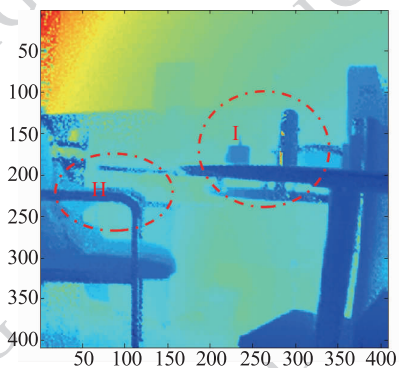
评价指标	传统 DAMRF 模型	本文方法
SNR/dB	21.625 1	25.057 3
RMSE	0.018 714	0.017 016



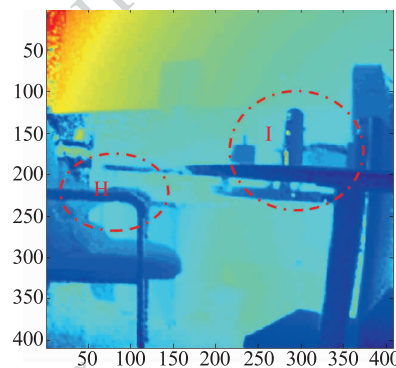
(a) 彩色相机拍摄的场景图像



(b) 低分辨率距离图像



(c) 传统 DAMRF 模型方法



(d) 本文方法

图 3 距离图像的重建结果对比

Fig. 3 The comparison of the reconstruction results on the range image

实验 2 为了比较传统 DAMRF 模型方法和本文方法对低分辨率距离图像的重建效果,利用彩色相机拍摄实验的场景图像,同时利用 PMD 相机捕捉 4 幅大小为 204×204 像素的低分辨率距离图像作为测试图像,4 幅连续的低分辨率距离图像之间存在亚像素位移,其运动位移参数如表 3 所示。初始的高分辨率图像估计通过对低分辨率距离图像进行

表 3 距离图像的运动参数

Table 3 The motion parameters of range image

距离图像	X 方向平移	Y 方向平移
测试图像 1	0	0
测试图像 2	0.070 1	0.030 4
测试图像 3	0.104 5	0.025 0
测试图像 4	0.095 7	0.013 7

双线性插值得到,实验过程中正则化参数值选择为0.01。重建结果如图4所示,图中坐标表示距离图像的

像素坐标,图中长方形线框中所示的P、Q即为我们选取的研究目标,重建的性能评价结果如表4所示。

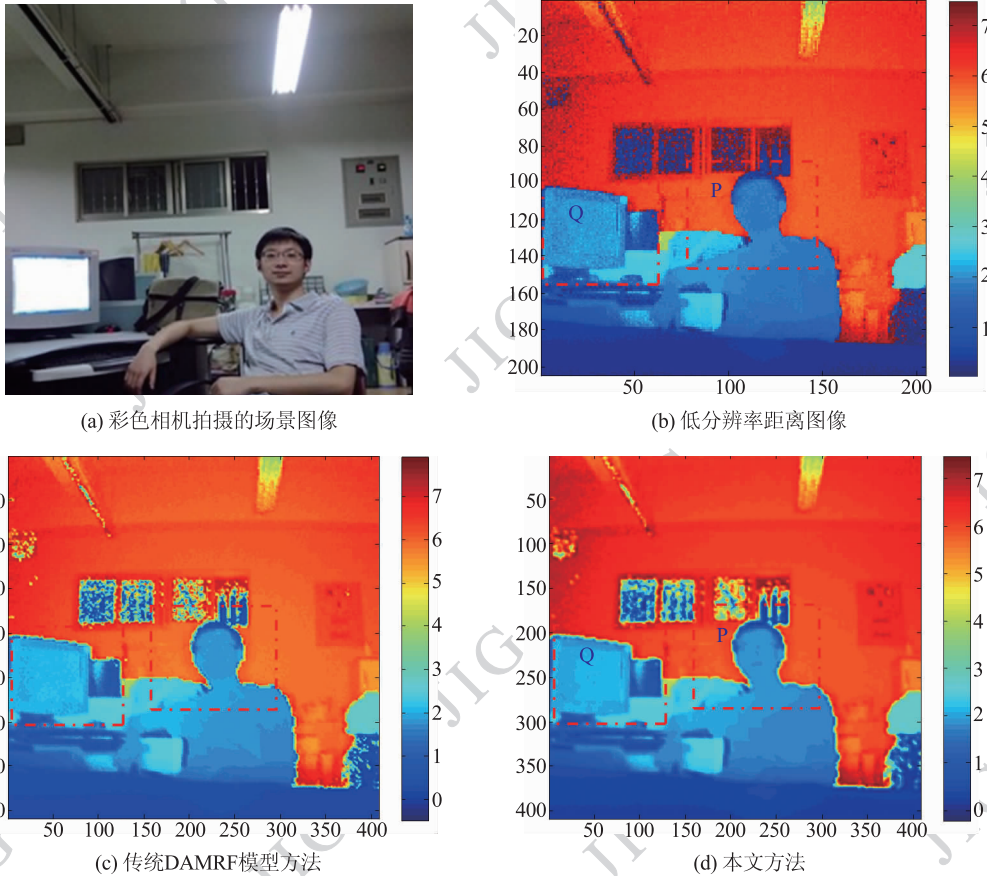


图4 距离图像的重建结果对比

Fig.4 The comparison of the reconstruction results on the range image

表4 距离图像重建结果的性能指标比较

Table 4 The performance index comparison of range image

评价指标	传统 DAMRF 模型	本文方法
SNR/dB	24.106 3	28.370 2
RMSE	0.0217 02	0.019 613

3.2 实验分析

从图3、图4、表2和表4可以看出,无论是在视觉效果还是性能评价方面,本文方法所得到的重建结果要优于传统DAMRF模型的超分辨率方法。从图3中椅子把手(H)和桌面上杯子(I)的主观视觉效果上来看,传统DAMRF模型方法获得重建图像的边缘信息、边缘连续和抑制噪声的效果并不十分理想;而本文方法有效地增强了H和I的边缘信息,克服了重建图像的边缘模糊,较好地保持了重建图像的边缘连续性,能够有效地对距离图像进行去噪。

从图4中人的脸部(P)和电脑屏幕(Q)的主观视觉效果上来看,传统DAMRF模型方法获得的重建图像在P、Q的边缘信息、边缘连续和抑制噪声的效果并没有得到较好的改善;而本文方法有效地增强了P和Q的边缘信息,改善了重建图像在P和Q的重建质量,噪声也得到较好的抑制。从表2和表4中的性能评价来看,本文方法获得重建图像的信噪比和均方根误差比传统DAMRF模型方法有较好的改善,获得重建图像的空间分辨率比传统DAMRF模型方法有较大的改进。因此,本文方法无论是在视觉效果还是性能评价方面,都优于传统DAMRF模型的超分辨率方法。

4 结论

针对PMD相机的主要缺点,本文在传统DAMRF模型的超分辨率图像重建方法基础上,

实现了一种改进的 DAMRF 模型的超分辨率重建方法。

该方法结合 PMD 相机幅度信息和双边滤波器之间的关系,利用双边滤波器由空间项和距离项乘积组成的特点,引入了可信度 A^2 作为权值对 DAMRF 模型中能量函数的距离项进行自适应加权,用具有较高可信度的像素距离值代替具有较低可信度的距离像素值,从而增加每个距离像素点在平滑过程中的权值,同时利用信噪比和均方根误差等性能评价标准对重建图像进行了评价和分析。

实验结果表明,本文方法优于传统 DAMRF 模型的超分辨率方法,不仅提高了距离图像的分辨率,也有效地增强了距离图像的边缘信息,较好地克服了重建图像边缘的不连续,能够很好地对距离图像进行去噪。采用 GNC 的优化算法避免了局部最小值的问题,从而获得重建图像的最优近似解。下一步的主要工作是研究选取不同正则化参数对距离图像重建结果的影响。

参考文献 (References)

- [1] Kil Y J, Mederos B, Amenta N. Laser scanner superresolution [C]// Proceedings of Symposium on Point-Based Graphics. Boston, USA: Eurographics Association, 2006: 9-15.
- [2] Ghobadi S E, Hartmann K, Weihs W, et al. Detection and classification of moving objects-stereo or time-of-flight images [C]// Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Security. Guangzhou, China: IEEE Press, 2006:11-16.
- [3] Uwe H, Marc A. Combining time-of-flight depth and stereo images without accurate extrinsic calibration [J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 2008, 5 (3-4):325-333.
- [4] Beder C, Bartczak B, Koeh R. A comparison of PMD-cameras and stereo-vision for the task of surface reconstruction using patchlets [C]// Proceedings of IEEE International Conference Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, MN: IEEE Press, 2007: 1-8.
- [5] Prasad T A, Hartmann K, Weihs W, et al. First steps in enhancing 3D vision technique using 2D/3D sensors [C]// Proceedings of the 11th Computer Vision Winter Workshop. Prague: Citeseer, 2006:82-86.
- [6] Huhle B, Fleck S, Schilling A. Integrating 3D time-of-flight camera data and high resolution images for 3DTV applications [C]// Proceedings of IEEE 3DTV-Conference. Kos Island: IEEE Press, 2007:1-4.
- [7] Rajagopalan A N, Bhavsar A V, Wallhoff F, et al. Resolution enhancement of PMD range maps [C]// Proceedings of the 30th DAGM symposium on Pattern Recognition. Munich, Germany: Springer, 2008:304-313.
- [8] Geman S, Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distribution and the Bayesian restoration of images [J]. IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence, 1984, 6(6):721-741.
- [9] Li S Z. Markov random field modeling in computer vision [M]. Tokyo:Springer, 1995:214-219.
- [10] Blake A, Zisserman A. Visual reconstruction [M]. Cambridge: The MIT Press, 1987:131-163.
- [11] Frank M, Paue M, Hamprecht F A. Denoising of continuous-wave time-of-light depth images using confidence measures [J]. Optical Engineering, 2009, 48(7):077003(1-13).
- [12] Elad M. Retinex by two bilateral filters [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Scale-space and PDE in Computer Vision. Hofgeismar, Germany: Springer, 2005: 217-229.