



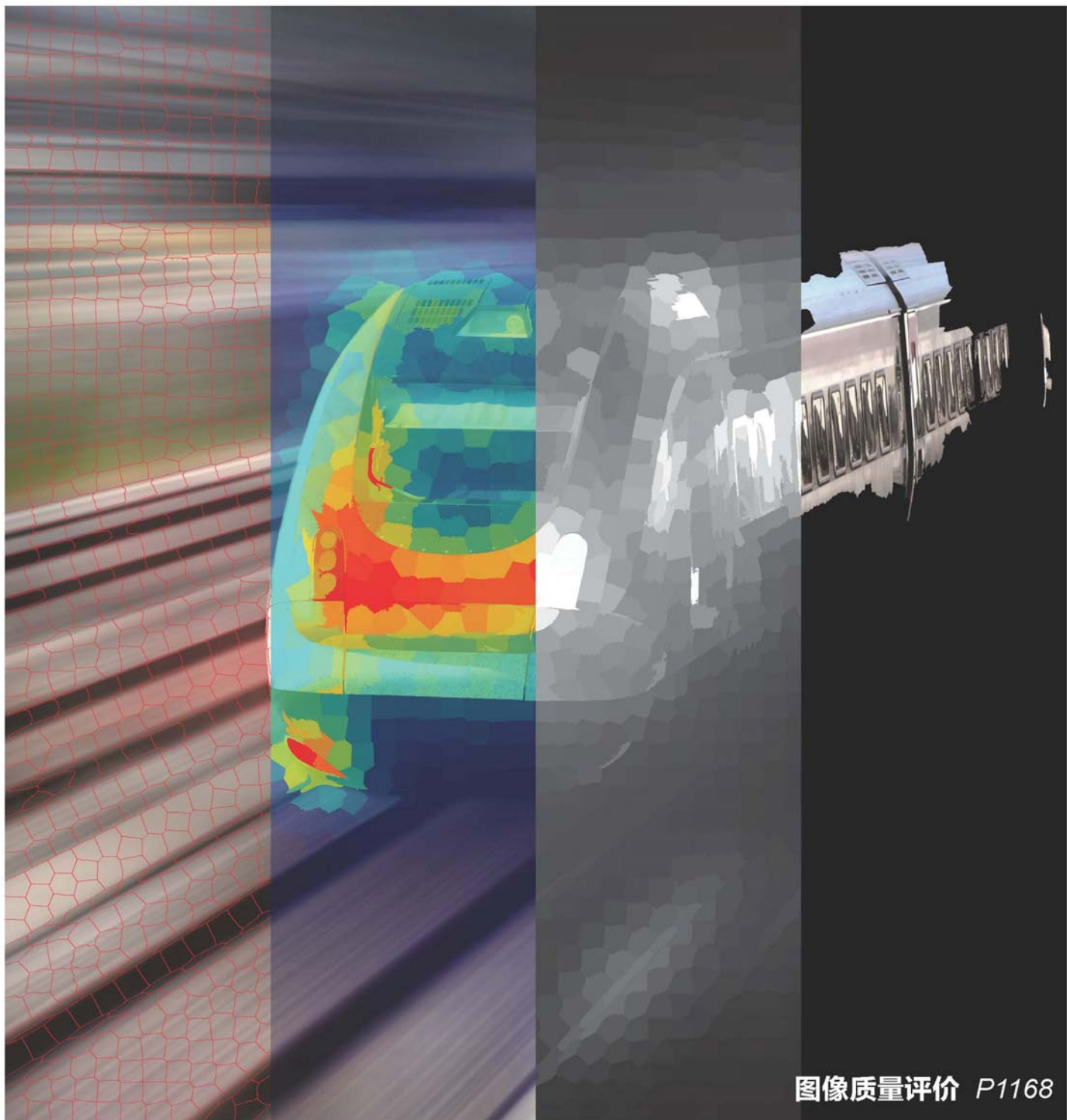
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

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

2014
08
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

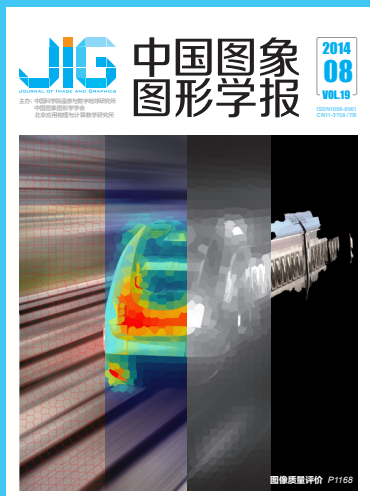


图像质量评价 P1168

中国图象图形学报

刊名题字: 宋健

月刊 (1996年创刊)



第19卷第8期 (总第220期)

2014年8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

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@irsa.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@irsa.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

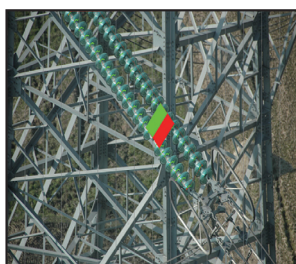
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



基于色调优化的图像视频细节增强(第1149页)



形状感知的绝缘子识别与缺陷诊断(第1194页)



基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建(第1210页)

图像处理和编码

利用纹理和空间相关性的HEVC帧内预测模式选择

齐美彬, 朱广辉, 杨艳芳, 蒋建国 1119

方向滤波抗混叠的低冗余图像多尺度变换

张湃, 王丽侠, 张银蒲 1126

L_{∞} 准则的最大误差图像压缩算法

李晓云, 庞超逸, 黎彤亮, 黄世中 1135

利用无参考图像内容量度优化非局部均值去噪方法的参数

侯鑫, 陆耀, 李建武 1142

基于色调优化的图像视频细节增强

王津航, 刘春晓, 朱臻阳, 金剑秋, 唐佳娣 1149

结合图像融合与分割的快速去雾

王伟鹏, 戴声奎 1155

彩色图约束的二阶广义总变分深度图超分辨率重建

邸维巍, 张旭东, 胡良梅, 段琳琳 1162

重要区域保持的图像缩放质量评价方法

梁云, 傅贤超, 刘财兴 1168

图像分析和识别

图嵌入正则化投影非负矩阵分解人脸图像特征提取

杜海顺, 张旭东 1176

基于稀疏编码的动态纹理识别

刘洋, 李一波, 姬晓飞, 王杨扬 1185

形状感知的绝缘子识别与缺陷诊断

张晶晶, 韩军, 赵亚博, 刘浪, 王万国, 朱铭武 1194

迭代最小二乘椭圆拟合的锥套图像检测与跟踪

黄斌, 孙永荣, 杨博文, 王潇潇, 刘晓俊 1202

图像理解和计算机视觉

基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建

杨宇翔, 曾毓, 何志伟, 高明煜 1210

医学图像处理

应用球形算子层次聚类的3维冠脉跟踪提取

郑永昌, 耿辰, 宋爽, 杨健 1219

遥感图像处理

波段排序的高光谱影像3维混合树编码方法

王相海, 解天, 宋传鸣, 张智迪 1228

多线程遥感影像实时渐进传输

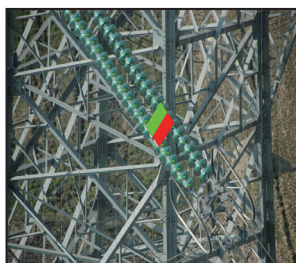
刘万军, 孟煜, 曲海成, 石翠萍 1237

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Image and video detail-enhancement via tone optimizationimage morphing(P1149)



Insulator Recognition and Defects Detection Based On Shape Perceptual (P1194)



Depth map super-resolution via adaptive weighting filter (P1210)

Image Processing and Coding

- HEVC intra-prediction mode selection by using texture and spatial correlation
Qi Meibin, Zhu Guanghui, Yang Yanfang, Jiang Jianguo 1119
- Low redundant image multiscale transform with anti-aliasing direction filtering
Zhang Pai, Wang Lixia, Zhang Yinpu 1126
- Algorithm for maximum error image compression based on L_{∞} norm
Li Xiaoyun, Pang Chaoyi, Li Tongliang, Huang Shizhong 1135
- Optimizing the parameters of non-local means via no-reference image content metric for image denoising
Hou Xin, Lu Yao, Li Jianwu 1142
- Image and video detail-enhancement via tone optimization
Wang Jinhang, Liu Chunxiao, Zhu Zhenyang, Jin Jianqiu, Tang Jiadi 1149
- Fast haze removal method based on image fusion and segmentation
Wang Weipeng, Dai Shengkui 1155
- Depth image super-resolution based on second-order total generalized variation constrained by color image
Di Weiwei, Zhang Xudong, Hu Liangmei, Duan Linlin 1162
- Image retargeting quality assessment by preserving important regions
Liang Yun, Fu Xianchao, Liu Caixing 1168

Image Analysis and Recognition

- Graph embedding regularized projective non-negative matrix factorization for face image feature extraction
Du Haishun, Zhang Xudong 1176
- Dynamic texture recognition based on sparse coding
Liu Yang, Li Yibo, Ji Xiaofei, Wang Yangyang 1185
- Insulator recognition and defects detection based on shape perceptual
Zhang Jingjing, Han Jun, Zhao Yabo, Liu Liang, Wang Wanguo, Zhu Mingwu 1194
- Droque image detecting and tracking based on iterative least squares ellipse fitting
Huang Bin, Sun Yongrong, Yang Bowen, Wang Xiaoxiao, Liu Xiaojun 1202

Image Understanding and Computer Vision

- Depth map super-resolution via adaptive weighting filter
Yang Yuxiang, Zeng Yu, He Zhiwei, Gao Mingyu 1210

Medicine Image Processing

- Novel 3D coronary artery extraction method using hierarchical clustering of spherical operator
Zheng Yongchang, Geng Chen, Song Shuang, Yang Jian 1219

Remote Sensing Image Processing

- Hyperspectral image coding with band ordering and 3D hybrid tree
Wang Xianghai, Xie Tian, Song Chuanming, Zhang Zhidi 1228
- Remote sensing image real-time progressive transmission based on multi-threads
Liu Wanjun, Meng Yu, Qu Haicheng, Shi Cuiping 1237

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)08-1210-09

论文引用格式: Yang Y X, Zeng Y, He Z W, Gao M Y. Depth map super-resolution via adaptive weighting filter[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(8): 1210-1218. [杨宇翔, 曾毓, 何志伟, 高明煜. 基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(8): 1210-1218.] [DOI:10.11834/jig.20140813]

基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建

杨宇翔, 曾毓, 何志伟, 高明煜

杭州电子科技大学电子信息学院, 杭州 310018

摘要: 目的 越来越多的应用都依赖于对真实场景深度图像的准确且快速的观测和分析。飞行时间相机可以实时获取场景的深度图像, 但是由于硬件条件的限制, 采集的深度图像分辨率较低, 无法满足实际应用的需要。为此提出一种结合合同场景彩色图像通过构造自适应权值滤波器对深度图像进行超分辨率重建的方法。方法 充分发掘深度图像的非局部以及局部自相似性先验约束, 结合合同场景的高分辨率彩色图像构造非局部及局部的自适应权值滤波算法对深度图像进行超分辨率重建。具体来说, 首先利用非局部滤波算法来有效避免重建结果的振铃效应, 然后利用局部滤波算法进一步提升重建的深度图像质量。结果 实验结果表明, 无论在客观指标还是视觉效果上, 基于自适应权值滤波的超分辨率重建算法较其他算法都可以得到更好的结果, 尤其当初的低分辨率深度图像质量较差的情况下, 本文方法的优势更加明显, 峰值信噪比可以得到 1dB 的提升。结论 结合非局部和局部自相似性先验约束, 结合合同场景的高分辨率彩色图像构造的自适应权值滤波算法, 较其他算法可以得到更理想的结果。

关键词: 深度图像; 超分辨率; 自适应权值滤波器; 非局部自相似性; 局部自相似性

Depth map super-resolution via adaptive weighting filter

Yang Yuxiang, Zeng Yu, He Zhiwei, Gao Mingyu

Department of Electronics Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Objective The ability to capture depth information of static real-world objects has reached increased importance in many fields of application, such as manufacturing and prototyping as well as the design of virtual worlds for movies and games. The use of time-of-flight camera to obtain the scene depth map is very convenient, but given the limitations of the hardware, the resolution of the depth map is very low and cannot meet the actual needs. How to improve the resolution of the depth image is an interesting topic. To overcome this problem, we propose a novel method for solving the depth map super-resolution problem. Given a low-resolution depth map as input, we recover a high-resolution depth map by using a registered high-resolution color image. **Method** Based on the benefits of non-local and local priors, we propose a novel adaptive weighting filter framework to solve this depth map super-resolution problem. Specifically, given that discontinuities in range and color tend to co-align, we formulate the non-local and local adaptive weighting filters based on the raw depth map and the features of high-resolution color images. With this non-local adaptive weighting filter, our algorithm can well prevent the depth super-resolution result from the jagged effect and is more robust to different initial depth input. Then, our local adaptive weighting filter can further improve the quality of the reconstructed depth results. **Result** Experiments demonstrate that our approach can obtain excellent high-resolution range images in terms of both spatial resolution and depth preci-

收稿日期: 2014-01-23; 修回日期: 2014-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207038); 浙江省自然科学基金项目(Q12F010017); 浙江省公益性项目(2013C32044)

第一作者简介: 杨宇翔(1987—), 男, 讲师, 2013 年于中国科学技术大学获工学博士学位, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理。

E-mail: yyx@hdu.edu.cn

sion. The Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) comparison experiments show that our method can reconstruct much better high-resolution range images compared with other state-of-the-art methods. Especially when the down-sample factor is larger, the performance of our algorithm is more obvious. **Conclusion** In this paper, we present an adaptive weighting filter framework for the depth map super-resolution problem. Based on the mutual benefits between the raw depth map and the visual features of the color image, we formulate the super-resolution process as an adaptive weighting filter integrating non-local and local priors. It is experimentally shown that the proposed methods can produce sharper edges and more faithful details compared with other state-of-the-art approaches.

Key words: depth map; super-resolution; adaptive weighting filter; nonlocal self-similarity; local self-similarity

0 引言

获取场景中各点相对于相机的距离是计算机视觉的重要任务之一,场景中各点相对于相机的距离可以用深度图像来表示。越来越多的应用如3维重建、碰撞检测、手势识别、机器人导航、工业自动化以及在电影和游戏中对虚拟场景的设计建模等^[1-4],都依赖于对真实场景深度信息的准确且快速的观测和分析。

通过计算机视觉中的立体匹配算法得到左右图像之间各对应点的视差关系从而计算得到深度信息^[5-6]是获得深度图的一类经典方法。但是由于左右图像之间遮挡以及无纹理区域的影响,立体匹配算法在实际应用中存在很大的局限性。因此,直接测量深度图像的方法越来越受到研究者的关注。激光测距扫描仪^[7]通过逐点扫描得到场景的深度图像,完成对一个场景的扫描要花费大量的时间,这限制了它们的应用。最近研究者们提出了一些新型的飞行时间相机^[8-10],通过给场景发送光脉冲,运用高速快门计算光脉冲的往返时间来确定场景中目标物的距离,飞行时间相机可以快速得到整幅场景的深度信息。但是,由于硬件的限制,飞行时间相机得到的场景深度图分辨率较低,很难满足实际应用的需要。从硬件系统方面进行改进面临很难克服的技术难题,从软件方面着手来提高深度图像的分辨率有着重大的意义和价值。深度图像的超分辨率重建问题就是指在不改变现有深度相机硬件系统的前提下,通过后期软件的方法来提高深度图像的分辨率和质量。

目前,深度图超分辨率算法大部分是从以下两个思路出发来解决问题:

1) 只利用深度图像的方法。该类方法将自然图像超分辨率算法思想运用到深度图像超分辨率问题中,通过构造目标函数将超分辨率问题转化为优化问题进行求解。Gevrekci 等人^[11]将凸集投影理

论运用到序列深度图像超分辨率问题中,提出了一种基于凸集投影的序列深度图超分辨率算法。Rajagopalan 等人^[12]将马尔可夫随机场模型运用到深度图像超分辨率问题中,认为深度图像满足 MRF 先验分布模型,采用最大后验概率方法构造优化目标函数。Schuon 等人^[13]将双边全变差正则约束项运用到序列深度图像超分辨率问题中,采用极大似然估计理论构建如下优化目标函数,得到了不错的结果。

这类方法只利用了深度图像的内在信息,由单幅低分辨率深度图像进行超分辨重建,分辨率只能得到2到3倍的提升。由于初始深度图像分辨率较低,重建后的深度图像还很难满足实际应用的需要。所以这类方法一般需要构造序列深度图像才能得到超分辨率的结果。但是目前构造序列深度图像时,对低分辨率深度图像之间的运动位移要求很高,必须是垂直于场景和飞行时间相机连线方向作细微的平移,这在一些实际的应用场合很难达到。一个解决的方法是构造飞行时间相机阵列来对同一场景采集深度图,但是飞行时间相机价格昂贵,构造飞行时间相机阵列代价较大。

2) 结合同场景彩色图像的方法。该类方法假设同场景的彩色图像和深度图像之间往往存在一致的不连续性,通过搭建 RGB-Depth 系统,发掘同场景彩色图像和深度图像之间的约束关系,利用同场景的高分辨率彩色图像来指导对深度图像的高分辨率重建。Diebel 等人^[14]运用马尔可夫随机场模型建立同场景彩色图像和深度图像之间的联系,Lu 等人^[15]对 Diebel 的马尔可夫随机场模型进行了改进。Yang 等人^[16]将联合双边滤波器^[17]运用到深度图像超分辨率重建问题中。Dolson 等人^[18]同样运用联合双边滤波器来解决深度视频的超分辨率重建问题。Yang 等人^[19]运用引导图像滤波器^[20-21]来指导深度图的超分辨重建。Yang 等人^[22]提出了利用彩色图像的局部结构特征来指导深度图的超分辨重建方法。Li 等人^[23]将稀疏表示理论运用到了深度图

像超分辨率问题中,提出了一种基于稀疏表示完备字典基的学习算法。总的来说,结合同场景彩色图像的深度图像超分辨率重建算法只需一幅彩色图像和一幅深度图像,运算效率高,系统搭建简单,是目前的一个研究热点。

但是,现有的结合同场景彩色图像的深度图像超分辨率算法还存在一些问题有待进一步完善。基于稀疏表示的深度图像超分辨率算法^[23]是一种机器学习的算法,需要花费大量的时间构造样本集进行学习训练。算法^[16-19]大多是运用图像滤波器,如:联合双边滤波^[17]、引导图像滤波^[21]等将彩色图像的信息融合到深度图像超分辨率算法中,虽然这些算法运算效率高,但是由于彩色图像纹理区域的影响,这些算法往往会将纹理信息映射到重建的深度图像中,影响重建的效果。最近, Park 等人^[24]运用结构滤波器^[25]提出了一种基于局部结构权值的深度图像超分辨率算法。该算法结合已知的低分辨率深度图像来计算权值,可以很好地避免彩色图像中纹理信息的错误映射问题。但是该算法对初始的深度图像非常敏感,当输入的低分辨率深度图像的质量比较差、分辨率较低的时候,重建的高分辨率深度图像会存在明显的振铃效应。

Buades 等人^[26]最先提出了非局部自相似性约束,作为一种图像去噪的方法得到了很好的去噪效果。Protter 等人^[27]将非局部自相似性约束引入到了自然图像的超分辨率重建问题中,对视频超分辨率重建取得了不错的结果。Favaro^[28]将非局部约束引入到了散焦测距问题中,也得到了很好的结果。非局部约束通过挖掘图像自身的自相似性,可以很好地避免重建结果中的振铃效应。故本文将非局部约束与局部约束相结合,充分发挥两者之间的互补性,结合同场景的高分辨率彩色图像图 1(a) 和低分辨率深度图像图 1(b) 构造非局部及局部的自适应权值滤波器,对深度图像(图 1(d))进行重建。

1 自适应权值滤波

对采用的符号首先进行说明: Y 表示飞行时间相机采集得到的低分辨率深度图像, F 表示同场景的高分辨率彩色图像, X 表示待重建的高分辨率高质量的深度图像。

为了避免在深度图像超分辨率重建过程中,



图 1 本文算法实验结果(原始深度图像尺寸为 695×555)

Fig. 1 Super-resolution result of the proposed method
(The resolution of the original depth map is 695×555)

彩色图像中纹理信息的错误映射问题, Park 等人^[24]结合已知的低分辨率深度图像来计算滤波权值。但是该算法对初始的深度图像非常敏感,当输入的低分辨率深度图像的质量比较差、分辨率较低的时候,重建的高分辨率深度图像会存在较明显的振铃效应。

非局部约束通过挖掘图像自身的自相似性,可以很好地避免重建结果中的振铃效应。鉴于非局部约束在图像重建问题中的成功应用,本文将非局部约束引入到深度图像的超分辨率问题中,结合非局部及局部自相似性约束,构造非局部及局部自适应权值滤波算法,对深度图像进行超分辨率重建。本文算法很好地挖掘了非局部及局部约束的互补性,较其他算法可以得到更好的深度图像重建结果。下面首先介绍非局部权值滤波的构造方式。

1.1 非局部权值滤波

考虑到同场景的彩色图像和深度图像在颜色和深度上存在相似的不连续性,颜色相同的两个区域,很有可能具有相同的深度。本文结合高分辨率的彩色信息和原始的深度信息来构造非局部自相似性,利用深度图像在非局部邻域内的自相似性构造非局部滤波权值。

本文的非局部自相似权值为

$$w_{ij}^N = \exp\left(-\frac{\|R(X_i) - R(X_j)\|_2^2}{M \cdot h_X^2}\right) \times \exp\left(-\frac{\|R(F_i) - R(F_j)\|_2^2}{M \cdot h_F^2}\right) \quad (1)$$

式中, $R(X_i)$ 表示以 X_i 为中心的局部块; $R(F_i)$ 表示以 F_i 为中心的局部块; M 是局部块内含有的像素点个数; h_X, h_F 是滤波器的参数, 用来控制加权计算的指数表达式的衰减速度。 w_{ij}^N 描述的是两个局部块 $R(F_i)$ 和 $R(F_j)$ 的相似度, 即两个局部块具有相同深度值的概率。

实验中, 在计算非局部权值时的搜索范围为 15×15 , 局部块大小为 5×5 , h_X 为 20, 参数 h_F 为 15。

这样, 对每一个局部块 $R(X_i)$, 得到滤波器形式为

$$\widehat{R}(X_i) = \frac{\sum_{R(X_j) \in N(R(X_i))} w_{ij}^N R(X_j)}{\sum_{R(X_j) \in N(R(X_i))} w_{ij}^N} \quad (2)$$

式中, $N(R(X_i))$ 表示 $R(X_i)$ 的所有非局部相似块, 但是点 X_i 会在多个局部块中出现, 这导致在不同的局部块内 X_i 会有不同的滤波结果, 故将 X_i 所有可能的滤波结果进行平均, 作为 X_i 最终的滤波输出值。

故非局部权值滤波器为

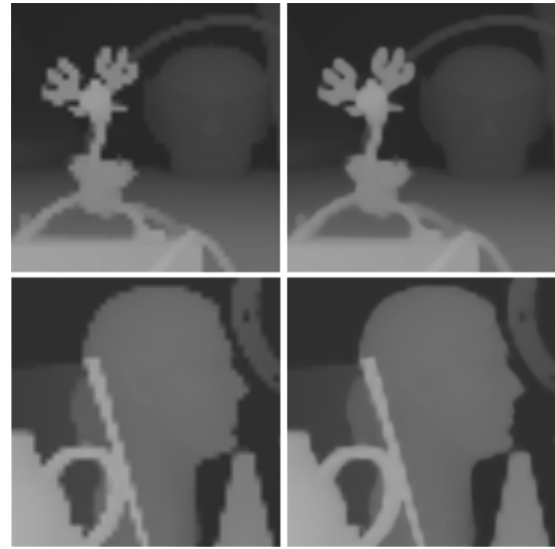
$$\widehat{X}_i = \frac{\sum_{k: X_i \in R(X_k)} \widehat{X}_i^k}{K} \quad (3)$$

式中, $\widehat{X}_i^k$ 表示 $X_i \in R(X_k)$ 时计算得到的滤波结果, K 是包含 X_i 的局部块个数。

图2给出了本文非局部权值滤波的结果。由图2(a)可以看出, 由于输入深度图像的分辨率非常低, 8倍双线性插值后的初始深度图像有非常严重的振铃现象。图2(b)是经过非局部权值滤波后的深度图像, 可以看出重建结果有了很大的改善, 很好地克服了振铃效应, 但是结果有些过平滑。故接下来进一步构造局部权值滤波器, 提升重建的深度图像的细节质量。

1.2 局部权值滤波

为了对深度图像的局部边缘结构提供更进一步的约束, 将结合场景的高分辨率的彩色信息构造局部自相似性参数模型, 并将该参数模型融入到正则约束项中。局部自相似性权值计算方案基于以下



(a) 双线性插值结果 (b) 非局部权值滤波结果

图2 非局部权值滤波结果(8倍超分辨率)

Fig. 2 Results of nonlocal weighting filter(×8)

两点观察得到:

1) 在彩色图像中含有相似颜色的两个区域, 很有可能具有相似的深度值;

2) 真实场景的表面基本都是分段光滑的。

结合上述的假设, 定义如下的局部自相似性参数, 局部权值可以分解为3个部分: 颜色相似性、距离相似性和深度相似性。

1) 颜色越相似, 说明它们有相同深度值的概率越大;

2) 空间距离越近, 表示它们有相同深度值的概率越大;

3) 初始深度的相似度越大, 说明它们最终有相同深度值的概率也越大。

$$w_{ij}^L = \begin{cases} W_c(i, j) W_s(i, j) W_d(i, j) & j \in L(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $j \in L(i)$ 表示 j 在 i 的局部邻域内 (本文局部邻域大小选为 7×7)。

颜色相似系数 $W_c(i, j)$ 定义为

$$W_c(i, j) = \begin{cases} \exp(-\|F_i - F_j\|^2 / \sigma_c^2) & j \in L(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

距离相似系数 $W_s(i, j)$ 定义为

$$W_s(i, j) = \begin{cases} \exp(-\|i - j\|^2 / \sigma_s^2) & j \in L(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

深度相似系数 $W_d(i, j)$ 定义为

$$W_d(i, j) = \begin{cases} \exp(-\|X_i - X_j\|^2 / \sigma_d^2) & j \in L(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

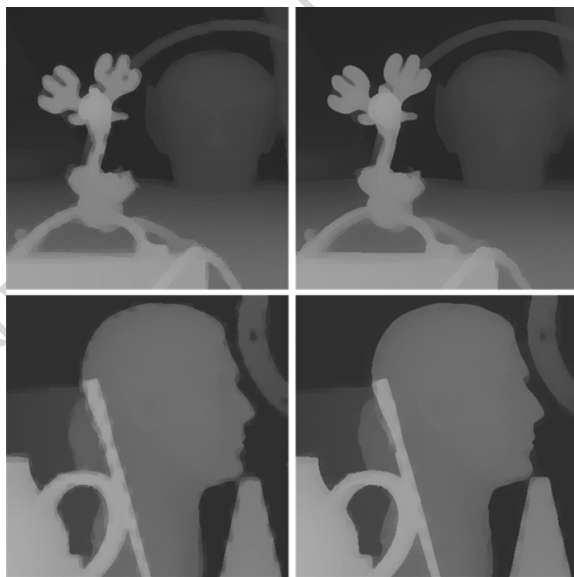
式中 σ_c 、 σ_s 和 σ_d 是滤波器的参数,用来控制加权计算的指数表达式的衰减速度。实验中, σ_s 选为局部窗口的半径;计算 F 当前局部窗内其他点和中心点的颜色值差异 $\sqrt{\|F_i - F_j\|_2^2}, j \in L(i)$, 自适应以当前颜色差异的中值作为当前 σ_c ; 根据 X 当前局部窗内其他点和中心点的深度值差异 $\sqrt{\|X_i - X_j\|_2^2}, j \in L(i)$, 自适应以当前深度差异的中值作为当前 σ_d 。

w_{ij}^L 越大说明它们有相同深度值的概率越大。故局部权值滤波器定义为

$$\hat{X}_i \approx \frac{\sum_{j \in L(i)} w_{ij}^L X_j}{\sum_{j \in L(i)} w_{ij}^L} \quad (8)$$

Park 等人^[24]运用了更多其他权值来共同描述局部自相似性,然而这些额外的权值都是从颜色相似性中抽取得到的,故增加的权值对重建结果的提升效果比较微弱^[24]。考虑到算法的运算效率,只采用这 3 个最基本的相似性权值构造局部参数结构,与非局部自相似性权值相结合,可以很好地避免振铃效应,重建高质量的深度图像。

图 3 给出了局部权值滤波的超分辨率重建结果。图 3(a)是直接对双线性插值结果进行局部滤



(a) 对图2(a)进行局部滤波的结果

(b) 对图2(b)进行局部滤波的结果

图 3 局部权值滤波结果(8 倍超分辨率)

Fig. 3 Results of Local weight filter(×8)

波的重建结果,可以看出由于双线性插值结果的振铃效应明显,会影响到局部自适应权值的构造,从而影响最终由局部权值滤波重建的深度图像的质量。图 3(b)是对本文非局部权值滤波结果再进行局部滤波的重建结果,可以看出,结合非局部和局部权值滤波的重建结果的深度边缘更加清晰光滑。本文构造的非局部权值滤波束可以很好地避免重建结果的振铃效应,而在此基础上局部滤波可以进一步提升边缘清晰度,提升重建质量。

1.3 算法流程

根据深度图像的成像过程,可以知道低分辨率深度图像和待重建的高分辨率深度图像之间不存在模糊关系,只存在采样关系,即

$$Y = DX \quad (9)$$

式中, D 为下采样算子。

为了保证重建的高分辨率深度图像和已知的低分辨率输入深度图像之间满足如上的成像模型,需要对重建的高分辨率深度图像进行反向投影,即

$$\hat{X} = X + D^T(DX - Y) \quad (10)$$

这样,按图 4 所示构建自适应权值滤波算法对深度图像进行超分辨率重建,实验中只需要 1 次非局部权值滤波和 5 次的局部权值滤波就可以重建得到高质量的深度图像。

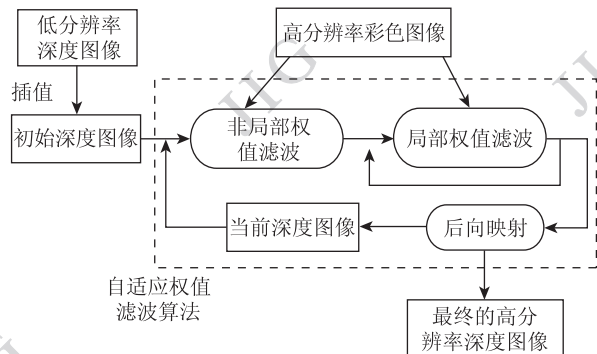


图 4 本文自适应权值滤波算法框图

Fig. 4 Proposed adaptive weighting filter method

2 实验分析

首先采用 Middlebury 数据集^[29]来验证本文算法的有效性。低分辨率深度测试图像由数据集中的高分辨率深度图(695×555)通过下采样(分别作 6 倍、8 倍和 10 倍的下采样)来获得。

为了说明本文算法的鲁棒性,图 5 给出了 He

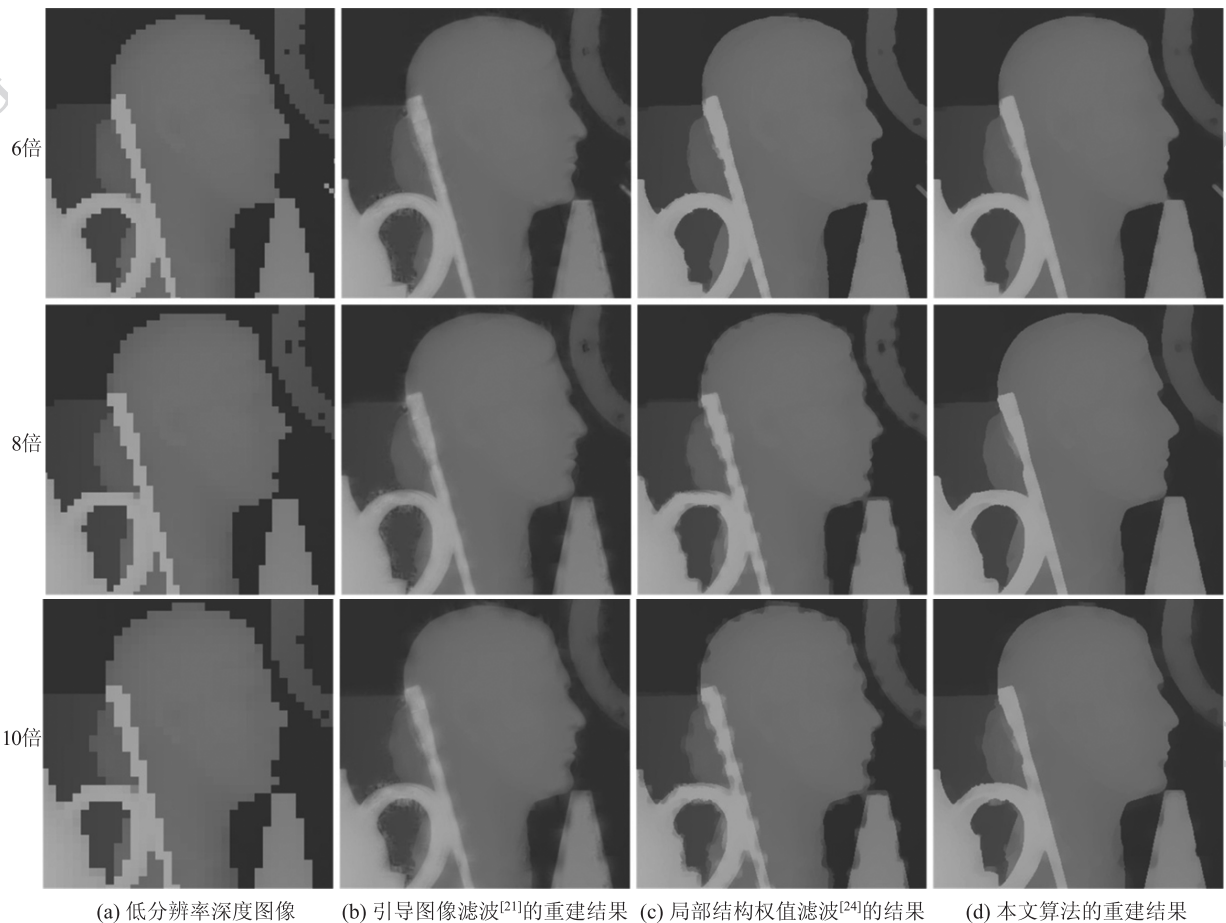


图 5 不同下采样率的重建实验结果比较

Fig. 5 Comparison of super-resolution results for different down-sample factors(6,8,10)

等人^[21]的引导图像滤波算法、Park 等人^[24]的局部结构权值滤波算法和本文算法对于测试图像 art 在不同下采样率下的超分辨率重建结果。从图 5(b)可以发现引导图像滤波算法会将彩色图像的纹理信息映射到重建的深度图像中,影响重建结果。而且随着下采样率变大,初始的深度图像质量变差,引导图像滤波算法的重建结果会越发不理想。从图 5(c)局部结构权值滤波的重建结果,可以发现这种局部权值滤波算法对输入的深度图像质量非常敏感,随着下采样率变大,局部结构权值滤波的重建结果会被振铃效应严重影响。从图 5(d)可以看出,本文算法非常鲁棒,即便下采样率达到 10,本文算法仍然可以重建得到满意的结果。

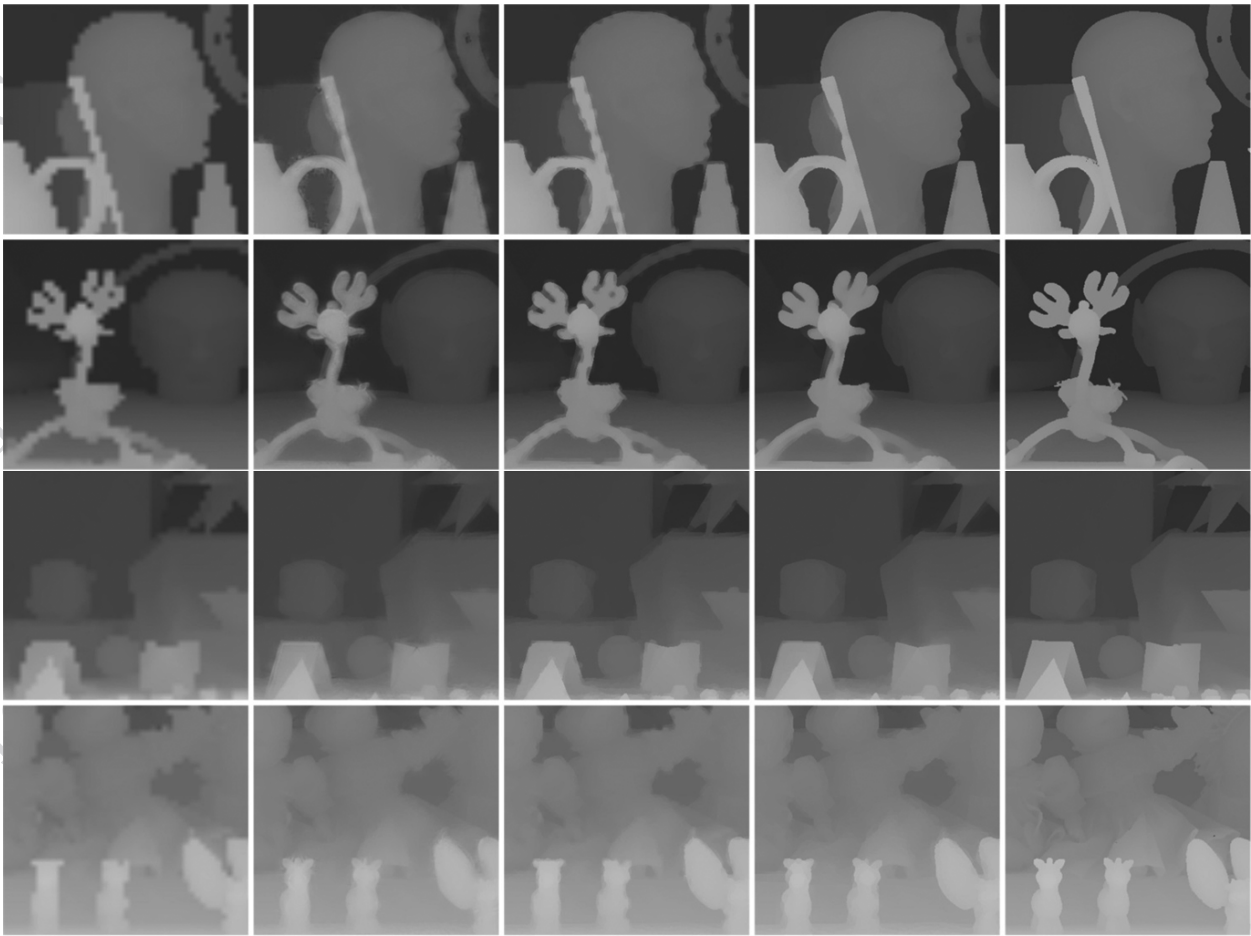
图 6 给出了本文算法和 He 等人^[21]的引导图像滤波算法及 Park 等人^[24]的局部结构权值算法在 Middlebury 数据集上实验结果的比较。由图 6 可以看出本文算法很好地结合了非局部和局部自相似性先验约束,重建的深度图像边缘质量更好,重建得到

的细节更加可信。

表 1 给出了针对不同的下采样率(6 倍、8 倍和 10 倍),本文算法和引导图像滤波算法^[21]及 Park 等人的局部结构权值算法^[24]重建结果在峰值信噪比 PSNR 上的客观指标比较。由数据结果可以看出,本文算法可以得到更好的 PSNR 值,而且随着下采样因子变大,输入的低分辨率图像的质量变差,本文算法的优势越发明显。

为了进一步验证本文算法的有效性,采用 Canesta EP Devkit 场景测试集^[30]来验证算法的有效性。Canesta EP Devkit 深度相机^[9]采集的低分辨率深度图像大小为 64×64 像素,测试集中对应的同场景高分辨率彩色图像大小为 640×640 像素。

图 7 将本文算法与引导图像滤波算法^[21]及 Park 等的局部结构权值算法^[24]进行比较,比较了不同算法重构的实际场景深度图像。图 7(b)是引导图像滤波的重建结果,可以发现引导图像滤波算法会将彩色图像的纹理信息映射到重建的深度图像



(a) 8倍双线性插值结果 (b) 引导图像滤波^[21]的结果 (c) 局部结构权值滤波^[24]的结果 (d) 本文算法结果 (e) 原始深度图像

图6 Middlebury数据集上重建结果比较
Fig. 6 Qualitative comparison on Middlebury dataset

表1 PSNR结果比较
Table1 Comparison of PSNR

									/dB
算法	art			reindeer			moebius		
	6	8	10	6	8	10	6	8	10
双线性插值	29.98	28.38	27.58	33.60	32.33	31.35	38.84	37.45	36.34
引导图像滤波 ^[21]	31.20	29.58	28.69	35.38	34.10	32.82	39.91	38.73	37.55
局部结构权值 ^[24]	31.83	29.70	28.71	36.36	34.59	33.04	40.64	39.14	37.68
本文算法	31.95	30.26	29.46	36.45	35.30	34.01	40.59	39.31	38.24

算法	dolls			laundry			books		
	6	8	10	6	8	10	6	8	10
双线性插值	39.93	38.71	37.79	34.21	33.32	32.25	37.58	36.37	35.69
引导图像滤波 ^[21]	41.12	40.03	39.03	35.80	34.70	33.50	38.38	37.35	36.68
局部结构权值 ^[24]	41.66	40.32	39.13	36.26	34.92	33.43	38.97	37.90	37.14
本文算法	41.85	40.75	39.86	36.50	35.60	34.60	39.10	38.71	38.17

注:黑体表示最佳结果

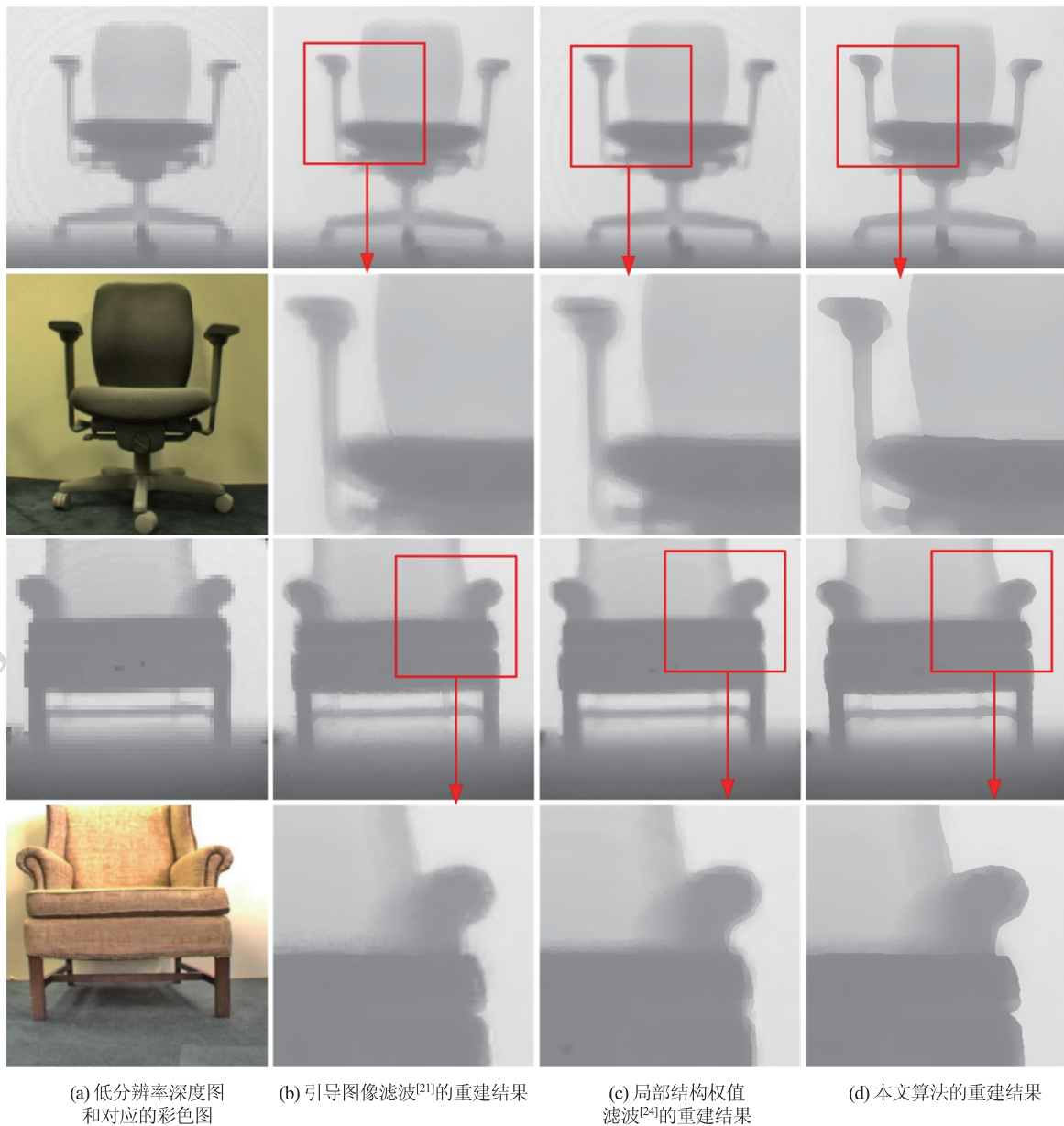


图7 Canesta EP Devkit 深度图超分辨率结果

Fig. 7 Qualitative comparison on Canesta EP Devkit camera

中,影响重建结果;图7(c)是局部结构权值滤波的重建结果,由于输入的初始低分辨率深度图像质量较差,局部结构权值滤波的重建结果存在较严重的振铃现象。由图7(d)可以看出,本文算法重建的深度图像边缘更加清晰,重建的图像质量更好。

3 结 论

结合非局部和局部自相似性先验约束,结合同场景的高分辨率彩色图像构造自适应权值滤波算法,对输入的低分辨率深度图像进行超分辨率重建。

算法首先结合彩色图像和深度图像构造非局部参数模型,利用深度图像在非局部邻域内的自相似性构造非局部权值滤波器。接着构建局部结构参数模型,开发局部权值滤波算法,对深度图的局部边缘结构提供更进一步的约束。实验结果表明,无论在客观指标还是视觉效果上,本文算法较其他算法都可以得到更理想的结果,尤其在初始的低分辨率深度图像质量较差的情况下,本文算法的优势更加明显。

参考文献 (References)

- [1] Riyad A, Huang J, Michael Y. Study on the use of microsoft ki-

- nect for robotics applications [C]//The Position Location and Navigation Symposium. South Carolina: IEEE Single Processing Society, 2012: 1280-1288.
- [2] Ishida Y, Izuoka H, Chinthaka H, et al. Study on plane extraction from distance images using 3D hough transform [C]//The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems. Kobe: Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, 2012: 812-816.
- [3] Rodriguez J, Burrus N, Abderrahim M. A-contrario detection of aerial target using a Time-of-Flight camera [C]// Proceedings of Sensor Signal Processing for Defence. London, United Kingdom: IEEE Single Processing Society, 2012: 1-5.
- [4] Fabian J, Young T, Jones J, et al. Integrating the microsoft kinect with simulink: real-time object tracking example [J]. IEEE Transaction on Mechatronics, 2012, 19(1): 249-257.
- [5] Hosni A, Rhemann C, Bleyer M, et al. Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 35(2): 504-511.
- [6] Zheng Z G, Wang Z F. A region based stereo matching algorithm using cooperative optimization [J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(5): 469-477. [郑志刚, 汪增福. 基于区域间协同优化的立体匹配算法 [J]. 自动化学报, 2009, 35(5): 469-477.]
- [7] Salvi J, Page J, Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. Pattern Recognition, 2004, 37: 827-849.
- [8] PMD Technologies Camcube 2.0 [EB/OL]. 2010-03-10 [2012-05-05]. <http://www.pmdtec.com/>.
- [9] Canestavision electronic perception development kit, canestaine [EB/OL]. 2007-03-10 [2012-05-05] <http://www.canesta.com/html/developmentkits.htm>.
- [10] C. S. Swiss Ranger SR-2. The swiss center for electronics and microtechnology [EB/OL]. 2010-02-20 [2012-05-05] <http://www.csem.ch/fs/imaging.htm>.
- [11] Gevrekci M, Pakin K. Depth map super resolution [C]//Proceedings of 18th International Conference on Image Processing. Brussels, Belgium: IEEE Single Processing Society, 2011: 3449-3452.
- [12] Rajagopalan A N, Bhavsar A, Wallhoff F, et al. Resolution enhancement of PMD range maps [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5096: 304-313.
- [13] Schuon S, Theobalt C, Davis J, et al. LidarBoost: depth super-resolution for TOF 3D shape scanning [C]//Proceedings of the 22nd International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, USA: IEEE Computer Society, 2009: 343-350.
- [14] Diebel J, Thrun S. An application of Markov random fields to range sensing [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2006, 18: 291-298.
- [15] Lu J B, Min D, Pahwa R, et al. A revisit to MRF-based depth map super-resolution and enhancement [C]//Proceedings of the 36th International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Prague, Czech Republic: IEEE Single Processing Society, 2011: 985-988.
- [16] Yang Q X, Yang R G, Davis J, et al. Spatial-depth super-resolution for range images [C]//Proceedings of the 20th International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minnesota, USA: IEEE Computer Society, 2007: 1-8.
- [17] Kopf J, Cohen M, Lischinski D, et al. Joint bilateral upsampling [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): #96.
- [18] Dolson J, Baek J, Plagemann C, et al. Upsampling range data in dynamic environments [C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA, USA: IEEE Computer Society, 2010: 1141-1148.
- [19] Yang Y X, Wang Z F. Range image super-resolution via guided image filter [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Internet Multimedia Computing and Service. Wuhan, China: ACM Digital Library, 2012: 200-203.
- [20] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [C]//Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision. Crete, Greece: Springer, 2010: 1-14.
- [21] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [22] Yang Y X, Wang Z F. Depth map super-resolution based on the local structural features of color image [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 5(26): 454-459. [杨宇翔, 汪增福. 基于彩色图像局部结构特征的深度图超分辨率算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2013, 5(26): 454-459.]
- [23] Li Y J, Xue T F, Sun L F, et al. Joint example-based depth map super-resolution [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Multimedia and Expo. Melbourne, Australia: IEEE Single Processing Society, 2012: 152-157.
- [24] Park J, Kim H, Tai Y, et al. High quality depth map upsampling for 3D-TOF camera [C]//Proceedings of the 14th International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain: IEEE Computer Society, 2011: 1623-1630.
- [25] Chen J, Tang C, Wang J. Noise brush: interactive high quality image-noise separation [J]. ACM Transaction on Graphics, 2009, 28(5): #146.
- [26] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising [C]//Proceedings of the 18th International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, CA, USA: IEEE Computer Society, 2005: 60-65.
- [27] Protter M, Elad M, Takeda H, et al. Generalizing the nonlocal-means to super-resolution reconstruction [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(1): 36-51.
- [28] Favaro P. Recovering thin structures via nonlocal-means regularization with application to depth from defocus [C]//Proceedings of the 23th International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA, USA: IEEE Computer Society, 2010: 1133-1140.
- [29] Middlebury datasets [EB/OL]. 2001-03-10 [2011-07-05]. <http://vision.middlebury.edu/stereo/data/>.
- [30] Canesta EP Devkit Datasets [EB/OL]. 2007-02-10 [2012-03-05]. <http://www.cs.cityu.edu.hk/~qiyang/>.