



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

2015
01
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像模糊测量 P20



第20卷第1期（总第225期）

2015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

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@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

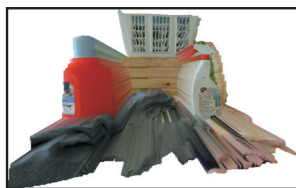
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

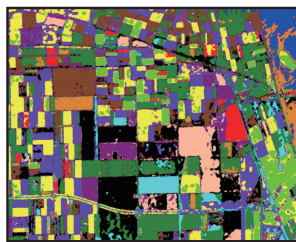
国内定价 50.00元



结合同场景立体图对的高质量深度图像重建(第0001页)



全局和局部结构内容自适应正则化的单幅图像超分辨模型(第0011页)



极化SAR相干斑抑制的非局部加权最小均方误差滤波算法(第0140页)

图像处理和编码

结合同场景立体图对的高质量深度图像重建

杨宇翔, 高明煜, 尹克, 吴占雄 0001

全局和局部结构内容自适应正则化的单幅图像超分辨模型

唐松泽, 肖亮, 黄伟, 刘鹏飞 0011

基于BP神经网络的图像局部模糊测量

黄善春, 方贤勇, 周健, 沈峰 0020

基于投影轮廓的文本图像倾斜检测

程立, 姚为, 李波 0029

图像分析和识别

稀疏表示和贪婪搜索的人脸分类

刘梓, 宋晓宁, 唐振民 0039

分块LBP的素描人脸识别

周汐, 曹林 0050

随机场中运动一致性的多线索目标跟踪

陈晨树, 张骏, 谢昭, 高隼 0059

融合背景权重直方图的目标跟踪

田浩, 巨永锋, 孟凡琨, 李涪帆 0072

英文字母特征的双面碎纸拼接

周一凡, 王松静, 黄永斌 0085

图像理解和计算机视觉

融合特征的快速SURF配准算法

罗天健, 刘秉瀚 0095

垂直交叉双向搜索策略的自适应窗口匹配算法

符立梅, 彭国华 0104

针对重复模式图像的成对特征点匹配

罗楠, 孙权森, 陈强, 纪则轩, 夏德深 0113

医学图像处理

量子衍生PDE医学超声图像去斑

付晓薇, 王奕, 陈黎, 田菁 0125

遥感图像处理

PCA与移动窗小波变换的高光谱决策融合分类

叶珍, 何明一 0132

极化SAR相干斑抑制的非局部加权最小均方误差滤波算法

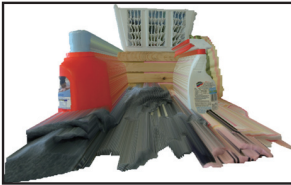
马晓双, 沈焕锋, 杨杰, 张良培 0140

数据筛选的低频UWB SAR图像快速可视化

李超, 李悦丽, 安道祥, 王广学 0151

CONTENTS

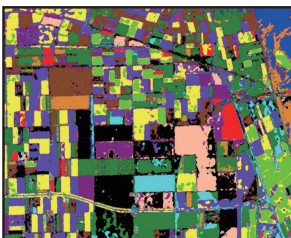
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



High-quality depth map reconstruction combining stereo image pair(P0001)



Global and local structural content adaptive regularization model for single image super-resolution(P0011)



PCA and windowed wavelet transform for hyperspectral decision fusion classification (P0140)

Image Processing and Coding

- High-quality depth map reconstruction combining stereo image pair
Yang Yuxiang, Gao Mingyu, Yin Ke, Wu Zhanxiong 0001
- Global and local structural content adaptive regularization model for single image super-resolution
Tang Songze, Xiao Liang, Huang Wei, Liu Pengfei 0011
- Image local blur measurement based on BP neural network
Huang Shanchun, Fang Xianyong, Zhou Jian, Shen Feng 0020
- Improved projection profile based algorithm for skew detecting in document images
Cheng Li, Yao Wei, Li Bo 0029

Image Analysis and Recognition

- Sparse representation based face recognition classification algorithm using greedy search strategy
Liu Zi, Song Xiaoning, Tang Zhenmin 0039
- The sketch face recognition combining with AdaBoost and blocking LBP
Zhou Xi, Cao Lin 0050
- Multi-cues object tracking based on motion consistence in random field
Chen Chenshu, Zhang Jun, Xie Zhao, Gao Jun 0059
- Improved tracking algorithm with background-weighted histogram
Tian Hao, Ju Yongfeng, Meng Fankun, Li Fufan 0072
- Double-sided shreds restoration based on English letters feature
Zhou Yifan, Wang Songjing, Huang Yongbin 0085

Image Understanding and Computer Vision

- Fast SURF key-points image registration algorithm by fusion features
Luo Tianjian, Liu Binghan 0095
- Cross-based bidirectional adaptive window for stereo matching
Fu Limei, Peng Guohua 0104
- Pair-wise feature points based matching algorithm for repetitive patterns images
Luo Nan, Sun Quansen, Chen Qiang, Ji Zexuan, Xia Deshen 0113

Medical Image Processing

- Quantum-inspired partial differential equation-based medical ultrasound image despeckling method
Fu Xiaowei, Wang Yi, Chen Li, Tian Jing 0125

Remote Sensing Image Processing

- PCA and windowed wavelet transform for hyperspectral decision fusion classification
Ye Zhen, He Mingyi 0132
- Polarimetric SAR speckle filtering using a nonlocal weighted minimum mean squared error filter
Ma Xiaoshuang, Shen Huanfeng, Yang Jie, Zhang Liangpei 0140
- Fast visualization method for UWB SAR images based on 3σ measurement
Li Chao, Li Yueli, An Daoxiang, Wang Guangxue 0151

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)01-0001-10

论文引用格式: Yang Y X, Gao M Y, Yin K, Wu Z X. High-quality depth map reconstruction combining stereo image pair[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(1): 0001-0010. [杨宇翔, 高明煜, 尹克, 吴占雄. 结合同场景立体图对的高质量深度图像重建[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(1): 0001-0010.][DOI:10.11834/jig.20150101]

结合同场景立体图对的高质量深度图像重建

杨宇翔, 高明煜, 尹克, 吴占雄

杭州电子科技大学电子信息学院, 杭州 310018

摘要: 目的 越来越多的应用依赖于对场景深度图像准确且快速的观测和分析, 如机器人导航以及在电影和游戏中对虚拟场景的设计建模等。飞行时间深度相机等直接的深度测量设备可以实时的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比较低, 无法满足实际应用的需要。通过立体匹配算法对左右立体图对之间进行匹配获得视差从而得到深度图像是计算机视觉的一种经典方法, 但是由于左右图像之间遮挡以及无纹理区域的影响, 立体匹配算法在这些区域无法匹配得到正确的视差, 导致立体匹配算法在实际应用中存在一定的局限性。**方法** 结合飞行时间深度相机等直接的深度测量设备和立体匹配算法的优势, 提出一种新的深度图像重建方法。首先结合直接的深度测量设备采集的深度图像来构造自适应局部匹配权值, 对左右图像之间的局部窗立体匹配过程进行约束, 得到基于立体匹配算法的深度图像; 然后基于左右检测原理将采集到的深度图像和匹配得到的深度图像进行有效融合; 接着提出一种局部权值滤波算法, 来进一步提高深度图像的重建质量。**结果** 实验结果表明, 无论在客观指标还是视觉效果上, 本文提出的深度图像重建算法较其他立体匹配算法可以得到更好的结果。其中错误率比较实验表明, 本文算法较传统的立体匹配算法在深度重建错误率上可以提升 10% 左右。峰值信噪比实验表明, 本文算法在峰值信噪比上可以得到 10 dB 左右的提升。**结论** 提出的深度图像重建方法通过结合高分辨率左右立体图对和初始的低分辨率深度图像, 可以有效地重建高质量高分辨率的深度图像。

关键词: 深度图像; 飞行时间深度相机; 立体匹配; 自适应权值匹配; 局部权值滤波

High-quality depth map reconstruction combining stereo image pair

Yang Yuxiang, Gao Mingyu, Yin Ke, Wu Zhanxiong

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

Abstract: Objective The capability to capture depth information of static real-world objects has achieved increased importance in many fields of application, such as manufacturing and prototyping, as well as in the design of virtual worlds for movies and games. A time-of-flight camera can conveniently obtain scene depth images. However, the resolution of a depth image is low and cannot satisfy actual requirements because of hardware limitations. Stereo matching algorithms are classical methods used to obtain depth images, but they are significantly limited in practical applications because of the occlusion between left and right images and the non-textured area. In this study, we propose a novel method to obtain a high-resolution, high-quality depth map by combining stereo matching with the use of a time-of-flight camera. **Method** We formulate a non-local adaptive weighting filter and obtain an initial high-resolution depth map using the low-resolution depth map from the

收稿日期: 2014-06-30; 修回日期: 2014-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61401129); 浙江省公益性项目(2013C32044); 浙江省自然科学基金项目(Q12F010017)

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

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61401129); Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Q12F010017)

time-of-flight camera. Then, we use the initial depth map and a local stereo matching algorithm to construct adaptive weights for stereo matching and obtain a raw depth map. Given that discontinuities within a range and coloring tend to co-align, we construct a local weighting filter using the raw depth map and the features of a high-resolution color image to reinforce the preservation of fine details. **Result** Experiments demonstrate that our approach can obtain an excellent high-resolution range image. Comparison experiments on peak signal-to-noise ratio and error rate show that our method can reconstruct high-quality depth maps. **Conclusion** The proposed method can produce sharper edges and more accurate details compared with other state-of-the-art approaches.

Key words: depth map; time of flight camera; stereo matching; adaptive weighting match; local weighting filter

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。场景中各点相对于相机的距离可以用深度图像来表示,即深度图像中的每一个像素值表示的是场景中某一点与相机之间的距离。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。目前,深度图像的获取手段主要有:1)通过直接的测量仪器观测得到深度图像;2)通过立体匹配的方法计算得到深度图像。

飞行时间深度相机(time-of-flight camera)(<http://www.pmdtec.com>)是直接测量深度图像的主要方法。飞行时间深度相机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,飞行时间深度相机可以快速得到整幅场景的深度图像。但是由于硬件的限制,飞行时间深度相机得到的场景深度图分辨率比较低,很难满足实际应用的需要。如Swiss Ranger 4000深度相机^[5]只能输出 176×144 大小的深度图像,PMD Technologies Camcube 2.0(<http://www.csem.ch/fs/imaging.htm>)也只能输出 204×204 大小的深度图像。要从硬件系统方面对飞行时间深度相机进行改进面临很难克服的技术难题,过低的分辨率限制了飞行时间深度相机等直接的深度测量设备在一些场合的应用。

通过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图像是计算机视觉的经典方法。传统上可以将立体匹配算法分为局部匹配^[5-10]和全局优化^[11-12]两大类。最近,基于自适应

权值的局部窗口匹配算法^[6-10]取得了突破性进展。这些算法可以有效的构造匹配代价,虽然这些算法的视差选择方法是最简单的 WTA (winners-take-all) 算法,但是最后得到的结果可以和全局优化的相比。而且这些基于自适应权值的局部窗口匹配算法运算效率高,是目前立体视觉研究的热点。基于局部窗的立体匹配方法的难点是如何选择相关窗口的大小:一方面选取的窗口要足够大以至于窗口内的像素值应该以一定的规律变化或者说有较好的纹理;另一方面选取的窗口要足够小以至于窗口内的视差是没有变化的。这样如何选择窗口的大小就成为关键的问题。如果选择大的窗口,那么低纹理区域的匹配准确率会增加,但边缘处的视差会模糊不清;如果选择小的窗口,那么低纹理区域的匹配准确率就会下降。为此研究者们提出了许多改进的算法。“可变窗”算法^[7]试图为每一个待匹配点找到最优的窗口大小,这种“可变窗”算法实现起来比较复杂,算法复杂度较高。2006年 Yoon 等人^[8]最先提出了一种自适应权值的方法,利用自适应权值的思想巧妙地实现了“可变窗”的功能,该方法认为图像中彩色信息一致的点具有一致的视差值。计算以欲匹配像素为中心的相关窗内其他点到中心点的颜色距离和空间距离,并由此来定义自适应权值。2007年 Tombari 等人^[9]在构造权值时将彩色图像的 Mean Shift 分割结果也考虑进来。2013年 Hosni 等人^[10]运用引导图像滤波理论^[13]来定义相关窗内各像素的自适应权值,提出了一种性能更好的局部窗自适应立体匹配算法。但是由于左右图像之间遮挡以及无纹理区域的影响,无论是局部还是全局立体匹配算法在遮挡以及无纹理区域上均无法匹配得到理想的视差结果,这一问题也一直是立体匹配算法很难突破的技术瓶颈,导致立体匹配算法在实际应用中存在一定的局限性。

考虑到飞行时间深度相机等直接的深度测量设备采集的深度图像分辨率比较低,无法很好地满足实际应用的需要,传统的立体匹配算法在遮挡以及无纹理区域上无法匹配得到理想的视差结果。故本文结合飞行时间深度相机等深度测量设备和立体匹配算法各自的优势,利用同场景的高分辨率左右立体图对和直接深度测量设备采集的低分辨率深度图像来重建高质量高分辨率的深度图像,本文拟构建系统如图1所示。首先利用高分辨率的彩色图像构造非局部滤波权重,对初始的低分辨率深度图像进行滤波得到初始的高分辨率深度图像。然后本文利用初始的高分辨率深度图像来构造左右立体图对之间的自适应局部匹配权重,得到基于局部立体匹配算法的深度图像。最后提出了一种局部权重滤波算法,将匹配得到的深度图像和采集得到的深度图像进行有效融合,重建最终的高分辨率高质量深度图像。实验结果表明,无论在客观指标还是视觉效果上,本文算法较传统的立体匹配算法都可以得到更好的结果。

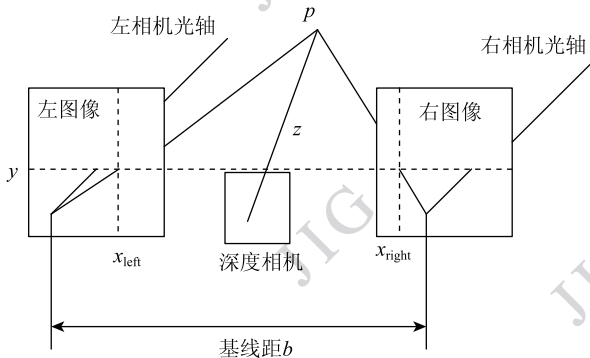


图1 结合深度相机和左右立体相机的深度图像重建系统

Fig. 1 Proposed depth map reconstruction system

1 本文算法

对采用的符号首先进行说明: Y (大小为 $N \times M$)表示采集得到的低分辨率深度图像, F (大小为 $rN \times rM$)表示同场景的高分辨率彩色左图像, F' (大小为 $rN \times rM$)表示高分辨率彩色右图像, X (大小为 $rN \times rM$)表示待重建的高分辨率高质量的深度图像。本文算法框图如图2所示。

1.1 非局部权重滤波

由于飞行时间深度相机等直接深度测量设备采

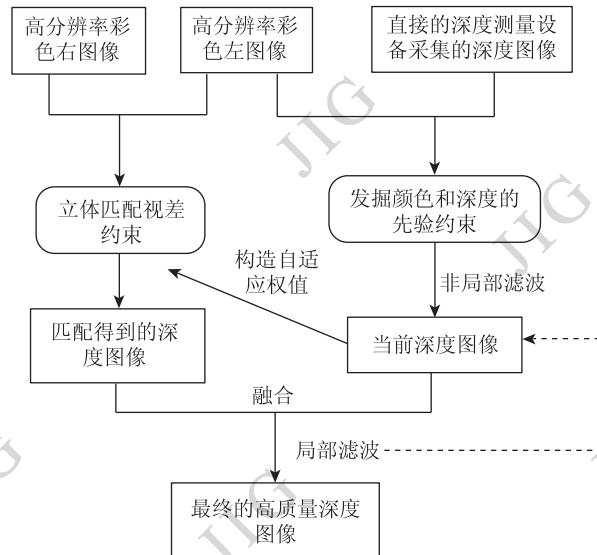


图2 本文算法框图

Fig. 2 Framework of the proposed method

集的深度图像分辨率非常低,只有不到正常彩色图像分辨率的1/5。首先需要对飞行时间深度相机采集的深度图像进行插值,但是由于上采样倍数比较大,传统的插值算法得到的深度图像会存在明显的振铃效应。

如图3所示,插值的深度图像存在明显振铃效应,将影响后续算法的性能。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

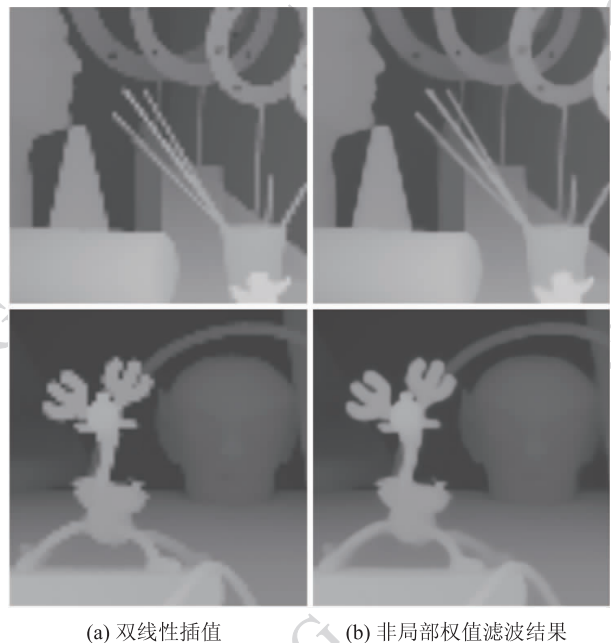


图3 双线性插值及非局部权重滤波结果比较(6倍上采样)

Fig. 3 Results of bilinear interpolation and nonlocal weighting filter ($\times 6$)

连续性,即颜色相同的两个区域,很有可能具有相同的深度,本文发掘同场景彩色图像和深度图像在颜色和深度上的内在联系,为深度图像的插值提供约束。

非局部自相似性(nonlocal self-similarity)最先由 Buades 等人^[14]提出,作为一种图像去噪的方法得到了很好的去噪效果。Dong 等人^[15-17]将非局部自相似性约束引入自然图像的超分辨率重建问题中,对自然图像的超分辨率重建取得了不错的结果。Favaro^[18]将非局部自相似约束引入散焦测距(depth from defocus)问题中,也得到了很好的重建结果。

非局部约束通过挖掘图像自身的自相似性,可以很好地避免高分辨率重建结果中的振铃效应。考虑到同场景的彩色图像和深度图像在颜色和深度上的约束关系,结合高分辨率彩色图像和采集得到的初始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来避免振铃效应,提高插值图像的质量。

基于上述分析,本文非局部自相似权重计算表达式为

$$w_{ij}^N = \exp\left(-\frac{\|R_i X^b - R_j X^b\|_2^2}{K \cdot h_x^2}\right) \times \exp\left(-\frac{\|R_i F - R_j F\|_2^2}{K \cdot h_F^2}\right) \quad (1)$$

式中, X^b 是对输入的低分辨率深度图像进行双线性插值后的结果, $R_i X^b$ 表示以 X_i^b 为中心的局部块, $R_i F$ 表示以 F_i 为中心的局部块, K 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 $R_i F, R_j F$ 的相似度,即两个局部区域具有相同深度值的概率。

首先利用传统双线性插值对采集得到的深度图像进行插值,然后利用上述非局部权值对插值结果进行滤波,得到初始的高分辨率深度图像,记为 X_{up} 。图3给出了双线性插值及本文非局部权值滤波算法的实验结果,由图3可以看出,本文的非局部权值滤波算法可以很好的避免振铃效应,可以提高插值图像的质量。

接下来,结合 X_{up} 来构造自适应局部匹配权值,对左右彩色图像进行局部匹配,求解视差。

1.2 自适应权值局部立体匹配

在局部匹配算法中,基于自适应权值局部窗的匹配方法是一种效率非常高的经典匹配算法^[8-10]。如图4所示,该类方法的核心思想是计算以当前欲匹配像素为中心的相关窗口的相似度,将相关性最高的那个点对记为成功的匹配。具体来说,该算法在参考图像中取一个以待匹配像素为中心的窗口,在匹配图像上同一扫描行的位置水平移动这个窗口,在视差范围内搜索最小匹配代价。

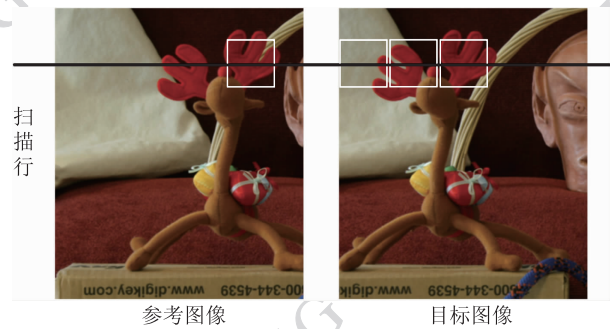


图4 局部匹配算法

Fig. 4 Local stereo matching algorithm

参考图像 F 和目标图像 F' 之间的匹配代价函数定义为

$$E(p, \bar{p}_d) = \frac{\sum_{q \in L(p), \bar{q}_d \in L(\bar{p}_d)} W(p, q) e(q, \bar{q}_d)}{\sum_{q \in L(p), \bar{q}_d \in L(\bar{p}_d)} W(p, q)} \quad (2)$$

式中, $E(p, \bar{p}_d)$ 表示匹配误差,表示参考图像 F 中的点 p 视差为 d 时, p 和目标图像 F' 中的对应点 $\bar{p}_d$ 之间的匹配度, $q \in L(p)$ 表示 q 在 p 的局部窗内, $\bar{q}_d \in L(\bar{p}_d)$ 表示 $\bar{q}_d$ 在 $\bar{p}_d$ 的局部窗内。选取对应点之间的彩色和梯度差来定义匹配度,这里考虑到是在同一个扫描行,所以只比较在 x 方向上的梯度差为

$$e(q, \bar{q}_d) = \alpha \min(\|F(q) - F'(\bar{q}_d)\|, \tau_1) + (1 - \alpha) \min(\|\nabla_x F(q) - \nabla_x F'(\bar{q}_d)\|, \tau_2) \quad (3)$$

式中,参数 α 用来平衡彩色和梯度误差, τ_1, τ_2 为误差阈值。

按式(2)计算得到匹配代价函数,视差可由WTA算法得到

$$d_p = \arg \min_{d \in S_d} E(p, \bar{p}_d) \quad (4)$$

式中, $S_d = \{d_{\min}, \dots, d_{\max}\}$ 表示参考图像的视差范围。

所以基于自适应权值局部窗的匹配算法的关键是如何定义描述局部窗口内各点相对于中心点相似度的权值 $W(p, q)$ 。将结合 1.1 节得到的初始深度图像 X_{up} 来构造自适应局部匹配权值。

1.2.1 自适应匹配权值计算

结合上述分析,对参考图像 F 定义局部参数模型为

$$W(p, q) = \begin{cases} W_c(p, q) \cdot W_d(p, q) & q \in L(p) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $W_c(p, q)$ 为颜色相似系数, $W_d(p, q)$ 为深度相似系数。

颜色相似系数 $W_c(p, q)$ 定义为

$$W_c(p, q) = \begin{cases} \exp(-\|F(p) - F(q)\|^2 / \sigma_c^2) & q \in L(p) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $F(p), F(q)$ 为参考图像中 p, q 点对应的彩色值。 $W_c(p, q)$ 描述了 q, p 的颜色差异, 若它们的颜色相近, 则权值较大, 它们有相同视差的概率也越大。

深度相似系数 $W_d(p, q)$ 定义为

$$W_d(p, q) = \begin{cases} \exp(-\|X_{up}(p) - X_{up}(q)\|^2 / \sigma_d^2) & q \in L(p) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中, X_{up} 表示采集的深度图像经过双线性插值和非局部权值滤波后得到的初始高分辨率深度图像。 $X_{up}(p), X_{up}(q)$ 为 p, q 点对应的初始深度值。 $W_d(p, q)$ 描述了 q, p 点的深度差异, 它们的深度越相似, 权值越大, 它们有相同视差的概率也越大。

那么对每一个点 p , 计算得到其局部窗内其他点 q 及其权值 $W(p, q)$ 。这样对于和点 p 有相似彩色值及相近深度值的点会被分配得到较大的权值。从而以自适应权值的方式实现“可变窗”的功能。在初始深度图像 X_{up} 的约束下, 本文的自适应权值能更好地反映局部窗内各点相对于中心点的相似性, 能够得到更理想的左右视差匹配结果。

图 5 给出了本文自适应权值和引导图像滤波

权值^[10]的匹配结果比较。由图 5 可看出, 本文结合初始深度图像的自适应权值匹配的结果更加理想。



(a) 引导图像权值^[10]的匹配结果 (b) 本文自适应权值的匹配结果

图 5 立体匹配结果比较

Fig. 5 Results of our adaptive local stereo matching

1.2.2 左右检测

但是立体匹配算法得到的初始结果仍存在很多误匹配(如图 5), 其中大部分是由遮挡以及无纹理区域引起的。接下来采用左右检测来寻找那些正确匹配的点。

由于采集得到的初始深度图像是与左图像配准的, 所以当以左图像为参考图像, 右图像为目标图像进行匹配时, 本文运用 1.2.1 节中的自适应局部匹配权值来构造匹配代价函数, 从而由 WTA 算法计算得到视差 D 。

但当以右图像 F' 为参考图像, 左图像 F 为目标图像时, 由于初始的深度图像是与左图像配准的, 以右图像为参考图像时, 无法计算局部窗内各点的深度相似系数, 所以我们运用传统的颜色相似系数 $W_c(p, q)$ 和欧氏距离相似系数 $W_s(p, q)$ 来构造自适应局部匹配权值, 计算得到以右图像为参考图像时的视差, 记为 D' 。

$$W(p, q) = \begin{cases} W_c(p, q) \cdot W_s(p, q) & q \in L(p) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\|F'(p) - F'(q)\|^2}{\sigma_c^2}\right) \times \exp\left(-\frac{\|p - q\|^2}{\sigma_s^2}\right) & q \in L(p) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $W_s(p, q)$ 描述了 q, p 两个点的在空间距离上的相似性。

然后运用 D' , 对视差 D 进行左右检测, 即

$$D_p = D'_{p-D_p} \quad (9)$$

若视差满足式(9),则认为该点的视差是正确的。由这些正确匹配的视差,可以计算得到深度图像 X_{stereo} 。对那些错误匹配的点,首先用 X_{up} 中对应的深度值来填充 X_{stereo} (如图6所示);然后采用局部权值滤波算法对错点区域的深度进一步修正。

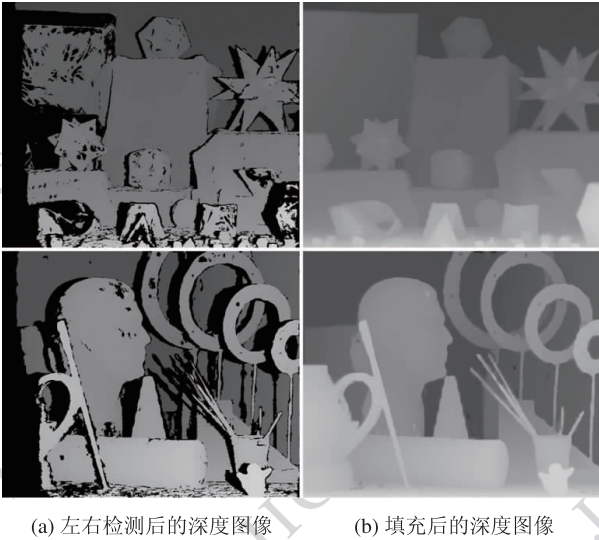


图6 左右检测及深度填充的效果(其中黑点表示错误点)

Fig. 6 Left-right detection and depth filling

1.3 局部权值滤波算法

为了对深度图像 X_{stereo} 中错点区域的深度进一步修正,使重建的深度图局部边缘质量更好。本文将结合场景的高分辨率彩色图像构造局部自相似性参数模型。

本文的局部自相似性权值计算方案是基于如下的两点观察得到的:

- 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。

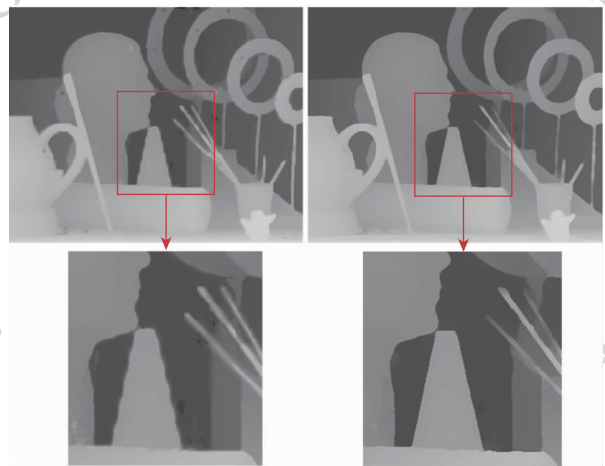
结合上述假设,定义如下的局部自相似性参数,本文局部权值可以分解为3个部分:颜色相似性、距离相似性和深度相似性。颜色相似度越大说明它们有相同深度值的概率越大,结构相似度越大表示它们有相同深度值的概率越大,初始深度相似度越大说明它们有相同深度值的概率也越大,即

$$w_{ij}^L = \exp(-\|F_i - F_j\|^2 / \sigma_c^2) \cdot \exp(-\|X_i - X_j\|^2 / \sigma_d^2) \cdot$$

$$\exp(-\|i - j\|^2 / \sigma_s^2), \quad j \in L(i) \quad (10)$$

式中, σ_c 、 σ_d 和 σ_s 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}^L 越大说明它们有相同深度值的概率越大。以 X_{stereo} 作为 X 的初始值,按式(10)计算局部权值,对 X 进行权值迭代滤波,每次迭代结束对权值进行更新,实验中一般需要5次的迭代,即可达到基本的收敛。

图7给出了局部权值滤波算法的效果。由图7可以看出,本文的局部权值滤波算法可以进一步提高深度图像的重建质量。



(a) 局部权值滤波前的深度图像 (b) 局部权值滤波后的深度图像

图7 局部权值滤波的效果

Fig. 7 Local weighting filtering

2 实验分析

采用 Middlebury 数据集 (<http://vision.middlebury.edu/stereo/data/>) 来验证本文算法的有效性。低分辨率深度图像由数据集中的高分辨率深度图 (695×555) 通过6倍下采样来获得。

实验中,非局部相似性权值时的搜索范围设为 17×17 ,局部块设为 5×5 ,参数 h_F 设为15, h_X 设为20。在计算局部窗口内相似性权值时,局部窗口的大小设为 11×11 , σ_s 设为窗口大小,计算 F 当前局部窗内其他点和中心点的颜色值差异 $\sqrt{\|F_i - F_j\|^2}$,自适应以当前颜色差异的中值作为当前 σ_c ;计算 X 当前局部窗内其他点和中心点的深度差异 $\sqrt{\|X_i - X_j\|^2}$,自适应以当前深度差异的中值作为当前 σ_d 。参数 α 用来平衡彩色和梯度误差,选为0.2;参数 τ_1, τ_2 分别选为7和2。

图8描述了本文算法的重建过程。由图8可以看出,本文算法重建的深度图像具有非常好的边缘质量和视觉效果。

为了进一步说明本文算法的效果,图9给出了本文算法和2013年Hosni等人^[10]的基于引导图像滤波权值的局部匹配算法,以及与匹配效果非常好的全局立体匹配算法^[12]的实验结果比较。图9(a)是引导图像滤波权值匹配算法^[10]的匹配结果,可以看出由于遮挡及无纹理区域的影响,该匹配算法在一些区域无法得到正确的匹配结果;图9(b)是全局立体匹配算法^[12]的匹配结果,该算法在局部匹配的基础上通过区域协同全局优化算法进一步对深度图像进行迭代优化,由图9(b)可以看出,在一些区域全局优化算法^[12]可以提升深度图像的质量得到更好的视觉效果,但是会将彩色图像的纹理映射到最终的深度图像中,严重影响重建的深度图像的质量;图9(c)是本文算法的结果,我们可以看出本文算法重建得到的细节更加可信。传统的立体匹配算法均无法有效处理遮挡以及无纹理区域错误匹配的问题,本文结合初始的低质量低分辨率深度图像,通过非局部及局部的权值滤波算法可以有效解决该问题,本文算法可以重建得到高质量的深度图像。

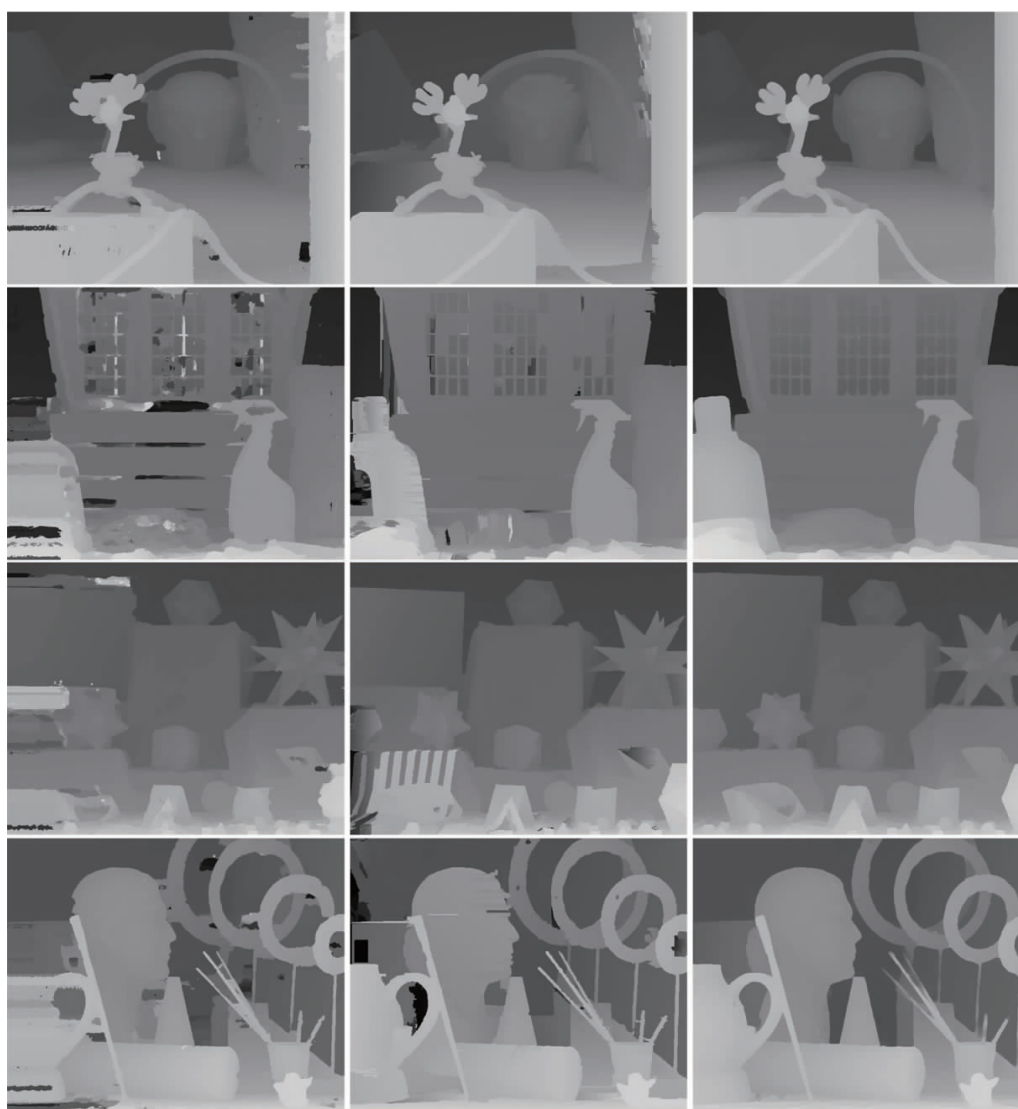
进一步,图10给出了上述不同算法重建的深度图像3维渲染后的结果比较。由图10可以看出,由本文算法重建的深度图像得到的3维渲染图像有更好的视觉效果,更符合实际场景的真实情况。

表1给出了本文算法和其他算法重建结果在错误率上的比较。本文实验中,将重建的深度图像与真实的深度图像进行比较,两者之间在视差上的差距大于1的点,则认为是错点。由此计算得到重建深度图像的错误率。由表1的数据结果可以看出,虽然全局匹配算法^[12]较局部匹配算法^[10]可以得到更好的视觉效果,但是由于全局匹配算法^[12]会引入错误的纹理映射,全局匹配算法^[12]最终的错误率反而是最差的。本文通过结合立体匹配思想和初始的低分辨率深度图像的算法可以得到最好的错误率。表2同时也给出了本文算法和其他算法重建结果在PSNR上的比较。由表2可以看出,本文算法也可以得到最好的PSNR值。结合图9和图10,表1和表2,可以看出,本文算法可以得到最好的重建结果,通过结合立体匹配思想和初始的低分辨率深度图像,可以很好地克服立体匹配算法存在的缺陷。



图8 深度图像重建过程

Fig. 8 High-quality depth map reconstructing



(a) 局部匹配算法^[10]的立体匹配结果 (b) 全局匹配算法^[12]的立体匹配结果 (c) 本文算法结果

图 9 重建结果比较

Fig. 9 Qualitative comparison of reconstruction for different methods



(a) 局部立体匹配结果^[10]渲染图像 (b) 全局立体匹配结果^[12]渲染图像 (c) 本文算法的渲染结果

图 10 3 维渲染结果比较

Fig. 10 Qualitative comparison for three-dimensional rendering

表1 各算法的深度错误率比较
Table 1 Comparison of error rate

算法	reindeer	laundry	moebius	art	dolls	books
局部匹配 ^[10]	10.6	26.3	14.9	19.3	13.1	20.4
全局匹配 ^[12]	29.2	29.9	23.2	27.2	21.5	29.7
本文算法	4.5	8.5	5.2	8.9	5.9	4.6

表2 各算法的PSNR比较
Table 2 Comparison of PSNR

算法	reindeer	laundry	moebius	art	dolls	books
局部匹配 ^[10]	25.6	19.9	24.5	22.5	28.1	20.5
全局匹配 ^[12]	27.1	22.9	24.7	24.5	26.4	22.4
本文算法	34.9	35.9	39.5	31.3	40.2	38.2

3 结 论

直接深度测量设备采集的深度图像分辨率比较低,无法满足实际应用的需要。传统的立体匹配算法由于左右图像之间遮挡以及无纹理区域的影响在实际应用中也存在很大的局限性。结合左右彩色立体图对和初始低分辨率深度图像,提出一种新的深度图像重建方法。首先利用高分辨率的彩色图像构造非局部滤波权值,对采集得到的低分辨率深度图像进行滤波得到初始的高分辨率深度图像;然后结合初始的深度图像来构造自适应局部匹配权值,对左右图像之间的局部窗立体匹配过程进行约束;接着基于左右检测原理将采集得到的深度图像和匹配得到的深度图像进行有效融合;最后提出一种局部权值滤波算法,来进一步提高重建的深度图像的质量。实验表明,通过结合初始低分辨率深度图像和左右高分辨率彩色立体图对,本文算法可以很好地克服传统立体匹配算法的缺陷,重建高质量高分辨率的深度图像。后续我们将构造实时采集系统,利用飞行时间深度相机采集的低分辨率深度图像和对应的高分辨率彩色立体图对,通过本文算法重建高质量高分辨率的深度图像。

参考文献 (References)

- [1] Riyad A, Huang j, Michael Y. Study on the use of microsoft kinect 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 Transactions on Mechatronics, 2012, 19(1): 249-257.
- [5] Ding J T, Du X, Zhou W H, et al. High performance implementation of stereo vision matching based on FPGA [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(3): 597-603. [丁菁汀, 杜歆, 周文晖, 等. 基于FPGA的立体视觉匹配的高性能实现 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 597-603.]
- [6] Veksler O. Stereo correspondence with compact windows via minimum ratio cycle [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(12): 1654-1660.
- [7] Veksler O. Fast variable window for stereo correspondence using integral images [C]// Proceeding of the 16th International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Madison, Wisconsin: IEEE Computer Society, 2003: 556-561.
- [8] Yoon K, Kweon S. Adaptive support-weight approach for correspondence search [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(4): 650-656.
- [9] Tombari F, Mattoccia S, Di Stefano L. Segmentation-based adaptive support for accurate stereo correspondence [J]. IEEE Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, 2007, 427-438.
- [10] Hosni A, Rhemann C, Bleyer M, et al. Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 35(2): 504-511.
- [11] 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.]
- [12] Wang Z F, Zheng Z G. A region based stereo matching algorithm using cooperative optimization [C]// Proceedings of the 21th International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, AK: IEEE Computer Society, 2008: 1-8.
- [13] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013,

- 35(6): 1397-1409.
- [14] 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.
- [15] Dong W S, Shi G M, Lin X, et al. Image reconstruction with locally adaptive sparsity and nonlocal robust regularization [J]. Signal Processing: Image Communication, 2012, 27(10): 1109-1122.
- [16] Dong W S, Zhang L, Lukac R, et al. Sparse representation based image interpolation with nonlocal autoregressive modeling [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2013, 22(4): 1382-1394.
- [17] Dong W S, Zhang L, Shi G M, et al. Nonlocally centralized sparse representation for image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(4): 1620-1630.
- [18] 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.