

# 基于多视差函数拟合的集成成像深度提取方法

王 宇 朴 燕

长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 集成成像系统采用微透镜阵列记录空间场景信息, 只有一次成像过程, 在获取场景深度时, 不存在相机的参数设置和校准问题, 简化了深度测量过程, 具有很大优势。但是由于该系统采集的元素图像分辨率低, 容易受记录噪声影响, 元素图像之间匹配困难。基于集成成像系统能够计算重构出多幅视图的优势, 充分利用多幅视图提供的冗余信息来改善立体匹配情况。采用颜色相似性的自适应窗口在参考视图与其他视图之间进行立体匹配, 得到参考视图与其他视图之间的视差信息, 利用视差与视图对之间的抽样距离满足正比函数关系的性质, 对多个视差值进行函数拟合, 减少了由于记录噪声等因素产生的误匹配, 物体深度层次的分辨更加准确。

**关键词** 成像系统; 集成成像; 深度提取; 立体匹配; 自适应匹配窗口; 函数拟合

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0411002

## Depth Extraction Based on Function Fitting for Multiple Disparities in Integral Imaging

Wang Yu Piao Yan

*College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** Microlens array is used to record the information of space scenes in integral imaging system by only one imaging process. During the acquisition of the depth, the parameter setting and calibration of the camera is unnecessary, then the depth measurement process is simplified, therefore the integral imaging has a great advantage. However, due to the low resolution of the elemental images collected in system, the stereo matching between the elemental images is difficult to reach and susceptible to the recorded noise. Based on the advantage of integral imaging system can calculate and reconstruct multiple viewing images, make full use of the redundant information provided by the multiple viewing images to improve the stereo matching. An adaptive window with color similarity is utilized in the stereo matching between the reference viewing image and other viewing images to obtain the disparity information. The function fitting for the multiple disparities of the reference viewing image is performed by considering the property that the disparity is proportional to the sampling distance between this pair of viewing images. This method can eliminate the mismatch resulting from factors such as the recording noise and make the discrimination more accurate between the depth levels of the object.

**Key words** imaging systems; integral imaging; depth extraction; stereo matching; adaptive matching window; function fitting

**OCIS codes** 110.3010; 110.880; 100.3010

### 1 引 言

三维集成成像(II)技术是一种新兴的全真三维显示技术, 它利用微透镜阵列实现三维场景的记录和重现。由于它具有全视差、连续视点、无需相干光源和其它辅助观看设备等优点, 成为近年来三维技术领域的热点<sup>[1-3]</sup>, 可广泛应用于三维图像识别、三维场景可视化、三维电视和立体显微成像、深度提取等领域。深度

收稿日期: 2014-09-17; 收到修改稿日期: 2014-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(60977011)、吉林省自然科学基金(201215142)、吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(2012-33)

作者简介: 王 宇(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要从事 3D 成像与图像处理方面的研究。E-mail: muxie2002@126.com

信息,即场景的空间位置,在虚拟现实仿真的增强现实技术、立体显示、远程医疗、遥感、导航、基于图形的绘制等方面有着广泛的应用,所以,深度提取一直是机器视觉研究领域的重要问题之一。

在经典的机器视觉领域,一般通过寻找两张或多张同一空间场景不同角度的图像之间的匹配关系来进行深度估算<sup>[4-5]</sup>。其中,确定摄像机的几何位置和有关参数一直是传统的机器视觉研究领域的困难所在。因为集成成像系统采用微透镜阵列从不同角度把物空间场景的深度信息记录下来,整个过程只有一次成像过程,不存在相机的参数设置和校准问题,简化了深度测量<sup>[6-7]</sup>,所以利用集成成像技术提取空间场景深度信息具有很大优势。

本文提出了一种利用集成成像技术获取空间场景深度信息的方法,基于集成成像系统能够计算重构出多幅视图的优势,充分利用多幅视图提供的冗余信息,进行视差值的函数拟合,减少了由于记录噪声等因素产生的错误匹配,从而提高获取的深度图质量。

## 2 集成成像与深度提取

三维集成成像的概念最早由诺贝尔奖获得者 Lippmann 于 1908 年提出,其关键点就是在采集和显示过程中引入了特殊的光学组件—微透镜阵列。通常 II 系统包括采集和显示(重构)两部分,如图 1 所示<sup>[8]</sup>。在三维数据采集阶段,电荷耦合器件(CCD)通过微透镜阵列采集到物体的三维信息。微透镜阵列是由许多完全相同的小透镜组成,这些小透镜产生物体的图像阵列(即元素图像阵列),被 CCD 记录和存储。在三维数据显示阶段,元素图像阵列显示在空间光调制器或液晶显示器等设备上,来自元素图像的光线被显示微透镜阵列折射,折射后的光线在空中叠加,就形成了所采集物体的三维图像。

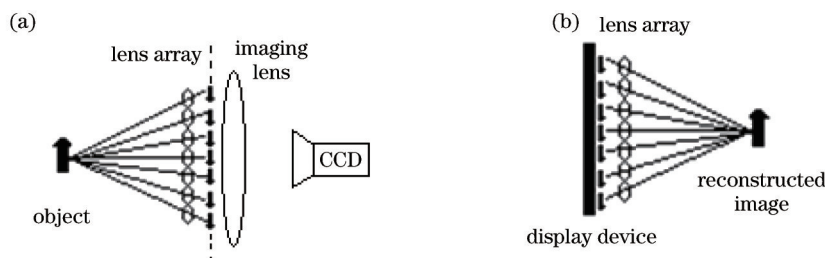


图 1 II 系统的采集和显示。(a)采集;(b)显示

Fig.1 Pickup and display in II system. (a) Pickup; (b) display

基于微透镜阵列的集成成像中,微透镜阵列和照相机被集成为一体。通过一次拍摄就能形成多幅元素图像,由于只用一个照相机,集成成像不存在相机的参数设置和校准问题,大大简化了深度测量。

近几年,出现了一些关于集成成像深度提取方法的研究。这些方法基本分为两种:1)对集成成像系统采集的两个元素图像进行立体匹配寻找深度信息<sup>[9-10]</sup>,2)是对系统采集的元素图像阵列提取不同视点的视图,然后在视图之间进行立体匹配以获取深度信息<sup>[6,11]</sup>。由集成成像系统的成像原理可知,每个元素图像的分辨率很低,通过直接对不同元素图像进行立体匹配寻找视差比较困难,并且元素图像的视场狭窄,只能探测到很小一部分的物场景深度。通常情况下,集成成像视图的视场大于元素图像的视场,而且视图的分辨率可以通过现有的计算机重构方法得到很大提高,因此,利用视图进行立体匹配获取深度信息的方法能够得到较好的效果。

在立体匹配中,一幅图像上的每一个特征点只能与另一幅图像上的唯一一个特征点对应,这一性质称为唯一性约束。但是由于大多数特征点不是十分明显,特别是重复纹理的出现,常常会产生对应多义性,即一幅图像上的一个特征点对应另一幅图像的若干个对应点,真正的对应点可能被其它假对应点所掩盖。如果采用多幅图像的匹配将有助于确定特征点之间的对应关系,由于探测器的缺陷像素或者光学系统的噪音影响,集成成像系统重构出的某些视图可能带有噪声,在这种情况下,如果使用多幅视图能提供足够的冗余信息,可以改善立体匹配效果。所以,本文将充分利用集成成像系统计算重构的多幅不同视点的视图信息,计算多个视图对之间的视差值,通过视差拟合减少由于记录噪声等因素产生的误匹配。

### 3 多视差拟合的集成成像深度提取

#### 3.1 多视点视图的计算机重构

在三维集成成像的显示过程中,可以通过计算机模拟微透镜阵列或针孔阵列,从元素图像阵列中提取三维信息,计算合成任意视点的重构图像,符合人眼观看三维集成成像系统的视觉习惯。

Arimoto等<sup>[12]</sup>提出了传统自由视点计算重构方法,如图2所示,按照重构视角不同,在每个元素图像中抽取特定位置的像素,合成重构图像。由于从每个元素图像中仅抽取一个像素,重构视图的像素数目等于微透镜的个数。因此,采用传统计算重构方法得到的重构图像分辨率很低,图像质量较差,进行视图之间的立体匹配比较困难。

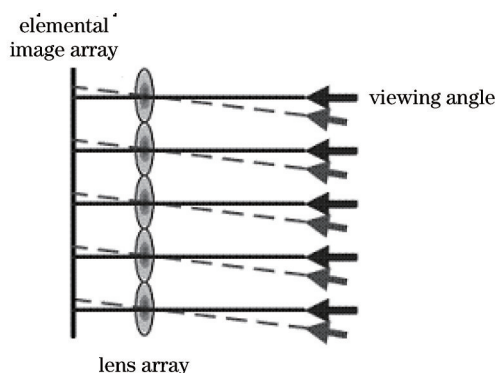


图2 视角和计算机重构视图的关系

Fig.2 Relation between viewing angle and computational reconstructed viewing image

为了提高计算机重构视图的分辨率,采用基于透镜阵列模型的计算机重构技术<sup>[13]</sup>,根据光线追踪原理,从每个元素图像中提取  $N_k^2$  个像素,  $N_k$  可表示为

$$N_k = \frac{\psi Lg}{(h + L)hP_1} \quad (1)$$

式中  $g$  为元素图像平面与微透镜阵列之间的距离,  $h$ 、 $L$  分别为微透镜成像平面与微透镜阵列、观察者之间的距离,  $\psi$  为微透镜孔径,  $P_1$  为元素图像平面的像素宽度。

这种计算机重构方法获得的视图分辨率较传统技术提高了  $N_k^2$  倍,为后续的视图之间的立体匹配工作奠定了基础。

#### 3.2 颜色相似性的自适应窗口立体匹配

在对两幅图像进行立体匹配寻找视差时,基于区域的立体匹配算法因为能够获得稠密的视差图而经常被使用<sup>[14-16]</sup>。基于区域的立体匹配算法主要是针对参考图像中的每个像素点,以像素点作为中心创建一个匹配窗口,在目标图像中找寻与该点相匹配的像素点。其中,匹配窗口的大小、形状对匹配结果影响很大,窗口过大,会导致边缘区域的轮廓模糊;窗口过小,会导致同质低纹理区域的误匹配。因此,为了获得较高的匹配精度,应该在不同图像特征的区域选择不同的匹配窗口,即采用自适应匹配窗口。

因为同一色彩区域相邻像素具有很大的视差相似性,所以将图像的颜色信息引入到立体匹配过程中非常重要。充分利用每个像素的颜色信息,在图像的不同区域,根据邻域像素与中心像素的颜色相似性自适应选择匹配窗口。也就是预先建立固定大小的搜索窗口,以参考图像的某像素点为中心,分别计算搜索窗口内每个像素与该中心像素的颜色差值的绝对值,如果该数值小于颜色相似性阈值,则对应像素属于自适应匹配窗口,否则,不属于自适应匹配窗口,按照这种原则可以建立每个像素的自适应匹配窗口。

集成成像系统计算重构出来的视图灰度不均匀,通常受到光照差异、噪声等因素干扰,这会影响立体匹配的准确性,根据颜色相似性构建自适应匹配窗口,能够增强算法的稳健性,降低图像边缘区域和深度不连续区域的误匹配。

#### 3.3 多视差函数拟合

如果仅利用两幅图像进行匹配算法分析会受到瑕疵像素的影响,产生误匹配。由于成像原理的特殊

性,集成成像系统能产生多幅连续视点的视图,这些视图存在的冗余信息提供了多个对应像素的匹配,可以降低瑕疵像素的影响。所以,从这一思路出发,以集成成像系统计算重构的多幅视图为基础,充分利用其中存在的冗余信息,减少由于记录噪声等因素产生的误匹配。

在计算机重构的多幅视图中,选择  $N$  幅具有连续水平视差的视图,相邻的两幅视图抽样距离为 1 pixel,也就是在视图生成过程时,从每个元素图像提取像素的位置在水平方向上距离为 1 pixel。以最左一幅视图为参考图像(也可以最右一幅视图为参考图像),分别与其他视图进行立体匹配,得到  $N-1$  幅视差图。下面讨论如何对  $N-1$  幅视差图进行函数拟合。

集成成像系统中,不同视图包含对同一场景沿不同方向的记录,物空间一点的深度  $Z$  与该点在视图对之间的视差  $d$  的关系为<sup>[7]</sup>

$$Z = \frac{d \cdot \psi \cdot F}{\Delta}, \quad (2)$$

式中  $\Delta$  表示两视图对之间的抽样距离,  $\psi$ 、 $F$  分别表示微透镜的孔径和焦距。

对于参考图像的某个像素点来说,  $Z$ 、 $\psi$ 、 $F$  都是固定值,所以视差  $d$  与抽样距离  $\Delta$  满足正比例函数关系,表示为

$$d = \frac{Z}{\psi \cdot F} \Delta. \quad (3)$$

本文方法中参考图像中的每个像素点都对应了  $N-1$  个视差值,这是由参考图像分别与其他  $N-1$  幅视图进行立体匹配计算得到的。参考图像与其他  $N-1$  幅视图生成时的像素提取位置的水平距离(即抽样距离)分别为 1、2、 $\dots$ 、 $N-1$  个像素。因此,分别以抽样距离为横坐标,以对应的视差值为纵坐标,对这  $N-1$  个点进行正比例函数拟合,拟合的系数即为该像素在抽样距离为 1 pixel 时的视差值。拟合后的视差值降低了由于记录噪声等因素产生的误匹配,准确度提高。

### 3.4 方法

经过前面的分析,将本文提出的集成成像深度提取方法总结如下:

1)以集成成像系统采集的二维元素图像集合为基础,采用计算机重构方法生成不同视点的多幅视图,从每个元素图像的局部相同位置提取像素即可形成一幅视图。改变从每个元素图像中提取像素的局部位置,即可形成不同视点的视图。

2)选择  $N$  幅具有连续水平视差的视图,以最左一幅视图为参考图像(也可以最右一幅视图为参考图像),分别与其他视图进行立体匹配,得到  $N-1$  幅视差图。

在两幅视图立体匹配过程中,采用基于颜色相似性的自适应立体匹配窗口,采用强度差值和梯度差值相结合的相似代价函数。参考图像中像素  $(i,j)$  与待匹配图像中对应像素在自适应匹配窗口中用来进行相似度测量的代价函数定义为

$$\text{Cost}(i,j,d) = C_{\text{color}}(i,j,d) + C_{\text{grad}}(i,j,d), \quad (4)$$

式中  $d$  为像素点  $(i,j)$  的视差,  $(i,j)$  和  $(i,j+d)$  分别是左右图像对应的像素点。设左图  $l$  为参考图像,右图  $r$  为待匹配图像。  $C_{\text{color}}(i,j,d)$  为 RGB 三个颜色通道的绝对差值之和,  $C_{\text{grad}}(i,j,d)$  为水平、垂直梯度的绝对差值之和,定义分别为

$$C_{\text{color}}(i,j,d) = |I_{\text{R}}^l(i,j) - I_{\text{R}}^r(i,j+d)| + |I_{\text{G}}^l(i,j) - I_{\text{G}}^r(i,j+d)| + |I_{\text{B}}^l(i,j) - I_{\text{B}}^r(i,j+d)|, \quad (5)$$

$$C_{\text{grad}}(i,j,d) = |\nabla_x I^l(i,j) - \nabla_x I^r(i,j+d)| + |\nabla_y I^l(i,j) - \nabla_y I^r(i,j+d)|. \quad (6)$$

设自适应匹配窗口  $W$  的像素个数为  $M$ ,根据(4)式,该像素与待匹配图像对应点在自适应窗口内的匹配代价定义如下

$$\text{AveCost}(i,j,d) = \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in W} \text{Cost}(i,j,d). \quad (7)$$

通过最小化匹配代价函数,得到像素  $(i,j)$  的最佳视差值为

$$d(i,j) = \arg \min_{d \in D} \text{AveCost}(i,j,d), \quad (8)$$

式中  $D = \{d_{\min}, \dots, d_{\max}\}$  是可行的视差搜索范围。

3)以参考图像的  $N-1$  幅视差图为基础,对每个像素点的  $N-1$  个视差值进行正比例函数拟合,拟合的系数即为该像素与最邻近视图(抽样距离为 1 pixel 的视图)的视差值。根据(2)式视差与深度的关系,即可获得参考图像的深度图。

#### 4 实验结果

为了验证前述方法的性能,下面进行集成成像系统的深度图生成实验。实验用的三维空间场景如图 3(a)所示,集成成像系统采集的二维元素图像集合如图 3(b)所示,微透镜阵列中的微透镜为正方形紧密排列,且具有  $1.08 \text{ mm} \times 1.08 \text{ mm}$  的统一尺寸,即  $\psi = 1.08 \text{ mm}$ ,每个微透镜的焦距  $f=3 \text{ mm}$ ,元素图像集合为  $52 \times 52$ ,每个元素图像为  $40 \text{ pixel} \times 40 \text{ pixel}$ 。

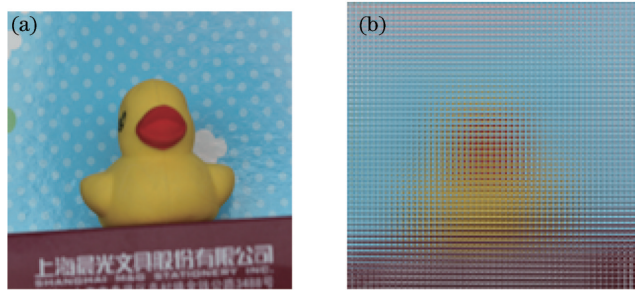


图 3 (a)空间场景;(b)采集的二维元素图像集合

Fig.3 (a) Space scene; (b) collection of 2D elemental images

采用基于透镜阵列模型的计算机重构方法<sup>[12]</sup>生成不同视点的多幅视图,选择其中六幅具有水平视差的视图进行深度图获取实验,如图 4 所示。

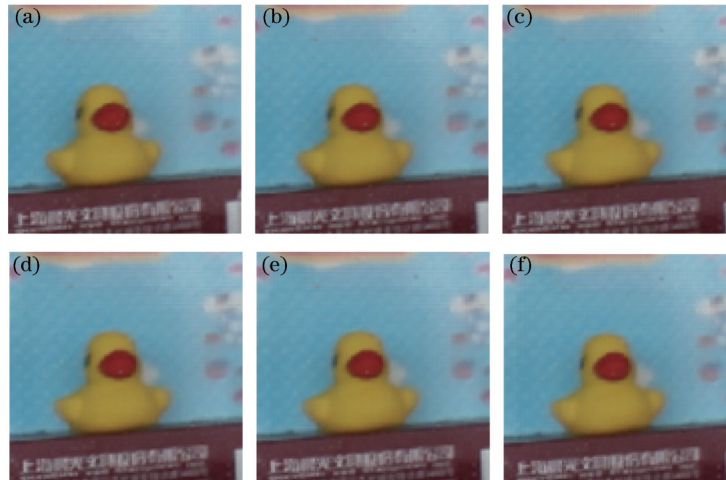


图 4 六幅具有不同水平视差的视图

Fig.4 Six viewing images with different horizontal disparities

以六幅视图中最左侧一幅为参考图像,分别与其他视图进行立体匹配。在立体匹配过程中,设定搜索窗口大小为  $31 \times 31$ ,颜色相似性判定阈值为 30,根据(4)~(8)式定义的匹配代价函数,分别采用固定窗口和自适应匹配窗口,依次完成参考图像与其余五幅视图的立体匹配,获得了参考图像的五幅视差图。如图 5 所示,上面一行图像是采用固定匹配窗口获得的五幅视差图,下面一行图像是采用自适应匹配窗口获得的五幅视差图,从实验结果可以看出,结合图像颜色信息的自适应窗口的匹配效果得到了明显的改善。

结合图 3(a)所示的三维空间场景图像可知,图 5 中的自适应匹配窗口获得的五幅视差图中仍然存在一些由于误匹配产生的错误视差值。以参考图像的五幅视差图为基础,对每个像素点的五个视差值进行正比例函数拟合,拟合的系数即为该像素在抽样距离为 1 pixel 时的视差值。根据(2)式中视差与深度的关系,即

可获得参考图像的深度图。最终获得的参考图像的深度图如图6所示,图像右边的标尺表示物体距离微透镜阵列的深度数值,标尺越往下数字越小,对应深度图中的颜色越暗,表示距离微透镜阵列越近。

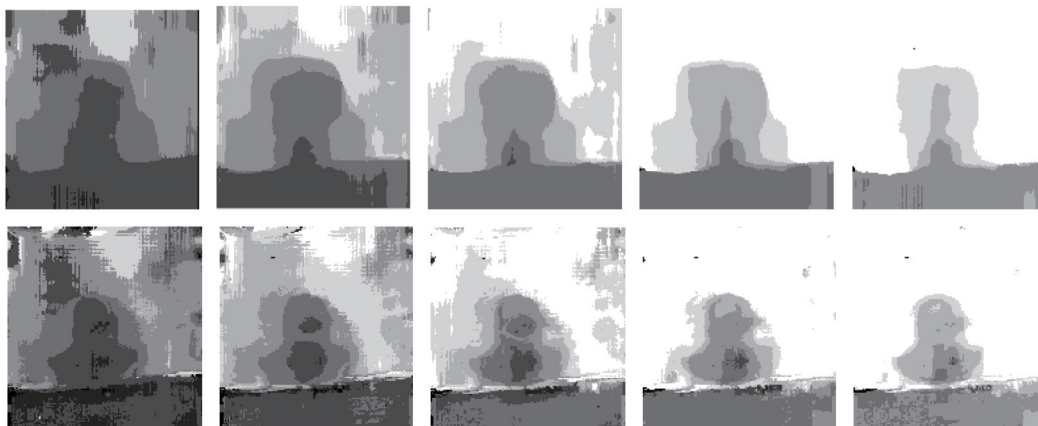


图5 参考图像的五幅视差图

Fig.5 Five disparity images of the reference image

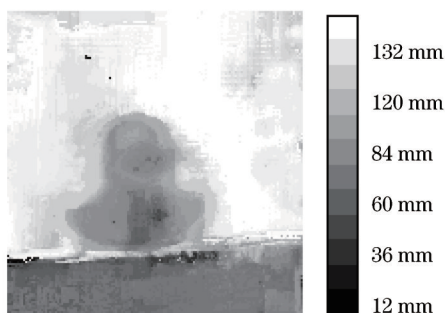


图6 拟合后的参考图像的深度图

Fig.6 Depth image of the reference image after function fitting

从图6的深度图可以清楚地看出场景中各物体的深度层次,深红色盒子、玩具鸭子、蓝色背景物体的深度层次清晰、均匀。深度越小,距离观看者也就越近,即深红色盒子离II捕获装置较近,而背景则较远。与多视差值函数拟合之前的结果相比,物体深度层次的分辨更加准确,深度图效果有了很大改善。

## 5 结 论

利用集成成像技术获取空间场景的深度图,不存在传统机器视觉中的相机参数设置和校准问题,简化了深度测量。充分利用集成成像系统的成像特点,提出了一种基于多视差拟合的深度图获取方法,对计算机重构的多视点视图分别进行自适应窗口的立体匹配,获得多幅视差图,并对多幅视差图进行函数拟合,减少了由于记录噪声等因素产生的误匹配,物体深度层次的分辨更加准确,深度图效果有了很大改善。

## 参 考 文 献

- 1 J Kim, J H Jung, C Jang. Real-time capturing and 3D visualization method based on integral imaging [J]. Opt Express, 2013, 21(16): 18742-18753.
- 2 F Yi, J Lee, I Moon. Simultaneous reconstruction of multiple depth images without off-focus points in integral imaging using a graphics processing unit [J]. Appl Opt, 2014, 53(13): 2777-2786.
- 3 Wu ChunHong, Wang QianQian, Wang HongXia, *et al.*. Spatial-resolution analysis and optimal design of integral imaging [J]. J Opt Soc Am A, 2013, 30(11): 2328-2333.
- 4 Tian Yanbing, Bai Jian, Huang Zhi. Depth estimation with a panoramic stereo imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0611002.

- 田延冰,白 剑,黄 治.基于全景环带立体成像系统的深度信息估计[J].光学学报,2013,33(6):0611002.
- 5 Gu Cheng, Qian Weixian, Chen Qian, *et al.*. Rapid head detection method based on binocular stereo vision [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108001.
- 顾 骋,钱惟贤,陈 钱.基于双目立体视觉的快速人头检测方法[J].中国激光,2014,41(1):0108001.
- 6 Liu Xianru, Cai Zixing, Yang Xinrong, *et al.*. Depth estimation method combined Integral Imaging and simulated annealing algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(8): 2303-2307.
- 刘献如,蔡自兴,杨欣荣,等. Integral Imaging与模拟退火相结合的深度测量方法研究[J].系统仿真学报,2009,21(8):2303-2307.
- 7 Wu Chunhong, Yang Yang, You Fucheng. A depth measurement approach based on Integral Imaging and multiple-baseline stereo matching algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1090-1095.
- 伍春洪,杨 扬,游福成.一种基于 Integral Imaging和多基线立体匹配算法的深度测量方法[J].电子学报,2006,34(6):1090-1095.
- 8 H Park, Y Kim, J Kim, *et al.*. Three-dimensional display scheme based on integral imaging with three-dimensional information processing [J]. Opt Express, 2004, 12(24): 6020-6032.
- 9 J Y Jang, J I Ser, S Cha, *et al.*. Depth extraction by using the correlation of the periodic function with an elemental image in integral imaging [J]. Appl Opt, 2012, 51(16): 3279-3286.
- 10 Xu Jing, Ming Hai. Enhanced depth extraction based on integral imaging with linear interpolation [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2012, 29(2): 135-141.
- 徐 晶,明 海.基于集成成像的深度提取线性插值增强方法[J].量子电子学报,2012,29(2):135-141.
- 11 H Yoo. Depth extraction for 3D objects via windowing technique in computational integral imaging with a lenslet array [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(7): 912-915.
- 12 H Arimoto, B Javidi. Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction [J]. Opt Lett, 2001, 26(3): 157-159.
- 13 D H Shin, B Lee, E S Kim. Improved viewing quality of 3D images in computational integral imaging reconstruction based on lenslet array model [J]. ETRI Journal, 2006, 28(4): 521-524.
- 14 Li Jiao, Qian Weixian, Chen Qian, *et al.*. An efficient stereo matching method based on Bayesian theory [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 101001.
- 李 娇,钱惟贤,陈 钱,等.一种基于贝叶斯理论的高效立体匹配方法[J].激光与光电子学进展,2014,51(10):101001.
- 15 Gong Wenbiao, Gu Guohua, Qian Weixian, *et al.*. Stereo matching algorithm based on the inter color correlation and adaptive support weight [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0812001.
- 龚文彪,顾国华,钱惟贤,等.基于颜色内相关和自适应支撑权重的立体匹配算法[J].中国激光,2014,41(8):0812001.
- 16 Zhu Shiping, Yang Liu. Stereo matching algorithm with graph cuts based on adaptive watershed [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0315004.
- 祝世平,杨 柳.基于自适应分水岭的图割的立体匹配算法[J].光学学报,2013,33(3):0315004.

栏目编辑:苏 岑