

采用双目立体相机的实时集成成像拍摄系统

赵敏,熊召龙,邢妍,李小伟,王琼华

(四川大学电子信息学院,四川成都 610065)

摘要:提出了一种基于双目立体相机的实时集成成像拍摄系统。不同于采用传统的摄像机阵列,该系统采用双目相机对三维场景进行拍摄,有效地简化了集成成像拍摄系统的结构。该系统首先利用双目相机获取三维场景的左右视差图,然后上传到图形处理器生成三维场景的高分辨率深度图,之后利用深度图和彩色纹理图在图形处理器中并行生成新视点视差图像,并利用像素映射算法生成高分辨率微图像阵列,实现实时的集成成像显示。实验中系统获取的深度图像素数目是微软 Kinect2 获取深度图像素数目的 4.25 倍,当系统运行在 1 920 pixel×1 080 pixel、9×9 视点数的环境下,可实现三维场景的实时拍摄与显示,实验结果证明了所提系统的可行性。

关键词:集成成像; 实时拍摄; 并行计算; 深度图

中图分类号: TB133 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1103007

Real-time integral imaging pickup system based on binocular stereo camera

Zhao Min, Xiong Zhaolong, Xing Yan, Li Xiaowei, Wang Qionghua

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A real time integral imaging pickup system was proposed using a binocular stereo camera. In the proposed system, the conventional camera array was replaced by the binocular stereo camera for three-dimensional (3D) scene pickup, which made the system simpler. In the system, left view and right view images were first captured by the binocular stereo camera, and the high-resolution depth map was calculated in the graphics processing unit. Then, the depth map and color texture image were used to generate the parallax images of new perspectives in parallax, and pixel mapping algorithm was adopted to obtain the high-resolution elemental image array for the real-time integral imaging display. In the experiment, the resolution of the calculated depth map was 4.25 times more than the depth map acquired by Microsoft Kinect2, the real-time pickup and display for 3D scene can be achieved in case the resolution of elemental image array was 1 920 pixel×1 080 pixel, and sub-images was 9×9. The experiment results demonstrate the effectiveness of the proposed system.

Key words: integral imaging; real-time pickup; parallel computation; depth map

收稿日期:2017-09-27; 修订日期:2017-10-17

基金项目:装备预先研究项目(JZX2016-0606/Y267)

作者简介:赵敏(1992-),男,硕士生,主要从事三维显示方面的研究。Email:602128569@qq.com

导师简介:王琼华(1969-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事信息显示方面的研究。Email:qhwang@scu.edu.cn

0 引言

集成成像是目前最具前景的裸眼三维(3D)技术之一,它具有全彩色、连续视差、无需辅助观看设备等诸多优点,主要包括拍摄和显示两个基本过程^[1-5]。传统的集成成像拍摄方法是利用微透镜阵列或针孔阵列对 3D 场景进行拍摄,不同视角的视差信息记录在后方的感光元件上,生成微图像阵列。这种方法在相邻单元图像上存在串扰,且分辨率低^[1]。之后,研究人员提出使用相机阵列代替微透镜阵列对 3D 场景进行拍摄,然而相机阵列结构复杂,成本高昂^[6-7]。2012 年,研究人员提出了基于双相机的集成成像拍摄系统,该系统采用两个倾斜排列的相机模拟两个微透镜对 3D 信息进行记录,然后计算出两幅图像中的同名点在不同图像元中的坐标位置并生成图像元,但该方法未计算出 3D 场景的深度图,当场景存在遮挡时,同名点的坐标位置计算复杂^[8]。也有研究人员提出使用微软 Kinect 获取的深度图和彩色纹理图生成微图像阵列^[9-10]。2014 年,研究人员提出了使用图形处理器(GPU)进行微图像阵列的加速生成,使得基于 Kinect 的集成成像系统能够实现实时拍摄和显示^[11]。然而,Kinect 的深度图质量不高,且分辨率有限,难以满足集成成像显示对高分辨率微图像阵列的要求。

文中提出了一种实时集成成像拍摄系统,通过采用双目相机对 3D 场景进行拍摄,简化了集成成像拍摄系统的结构,并利用统一计算设备架构(CUDA)多线程技术在 GPU 中进行并行计算,生成高分辨率的深度图用于视差图和微图像阵列的生成,从而实现了真实 3D 场景的实时拍摄与显示。实验结果验证了该系统的可行性。

1 系统的原理

1.1 系统的结构

为实现实时的集成成像显示,需要处理大量的数据,并行计算是十分有效的处理方法,其在图像处理领域被广泛使用^[12-13]。在文中所提系统中,采用 NVIDIA 公司推出的 CUDA 技术在 GPU 中进行并行计算。

实时集成成像拍摄系统结构如图 1 所示。该系

统包括两个部分:获取部分,对 3D 场景进行拍摄,得到左右视点的高分辨率视差图像;处理部分,利用 GPU 生成新视点视差图和微图像阵列。在系统中,双目相机获取 3D 场景的左右视差图后上传至 GPU 缓存区,GPU 通过多线程并行计算生成 3D 场景的高分辨率深度图,然后利用生成的深度图和彩色纹理图并行计算生成不同视角的视差图,在所有视差图生成后,利用像素映射算法生成高分辨率微图像阵列并渲染显示。

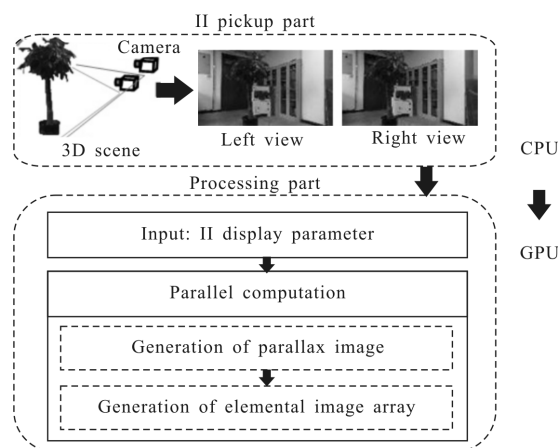


图 1 系统结构示意图

Fig.1 Configuration of the proposed system

1.2 视差图和微图像阵列的生成

视差图是 3D 场景在不同投影角度下的正交投影图像,将不同角度的视差图像重新分配至各个图像元中即可生成 3D 场景对应的微图像阵列。如图 2 所示,3D 场景经虚拟的微透镜阵列在微图像阵列平面上成像。投影角度为 θ 的平行光线能被提取形成一幅正交的视差图^[14-15],视差图的像素坐标由中心深度平面的位置和 3D 场景的深度值确定。

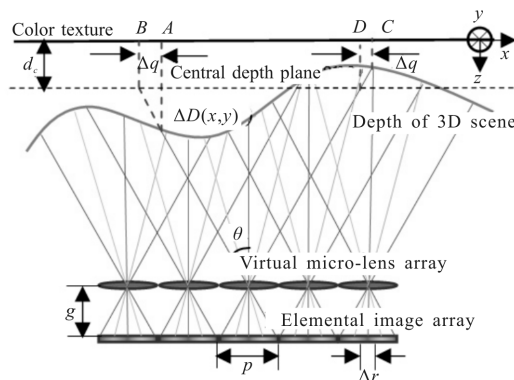


图 2 视差图生成原理图

Fig.2 Schematic diagram of parallax images generation

图像元中每个像素的尺寸为 Δr , 微透镜的节距为 p , 微透镜阵列和微图像阵列的距离为 g , 则投影角 θ 满足:

$$\theta=(\theta_x, \theta_y)=\left(\arctan \frac{\Delta r \cdot i}{g}, \arctan \frac{\Delta r \cdot j}{g}\right) \quad (1)$$

式中: $i, j=\text{floor}(-p/2\Delta r)-1, \text{floor}(-p/2\Delta r), \dots, \text{floor}(p/2\Delta r)+1, \text{floor}(*)$ 表示向下取整运算。

对不同投影角度的视差图像进行计算, 如图 2 所示, 当投影角度为 θ 时, 坐标为 (x, y) 的彩色纹理信息像素点 A 被映射到点 B 处, 两点之间的像素偏移量定义为 Δq , 其满足:

$$\Delta q=(\Delta q_x, \Delta q_y) \quad (2)$$

$$\Delta q_x=(\Delta D(x, y)-d_c) \cdot \tan \theta_x \quad (3)$$

$$\Delta q_y=(\Delta D(x, y)-d_c) \cdot \tan \theta_y \quad (4)$$

式中: $\Delta D(x, y)$ 为 (x, y) 位置处对应的深度值; d_c 为集成成像中心深度平面与零参考面 ($z=0$) 的距离。则投影角度为 θ 的视差图 $I_\theta(x, y)$ 满足:

$$I_\theta(x, y)=T(x+\Delta q_x, y+\Delta q_y) \quad (5)$$

式中: $T(x, y)$ 是彩色纹理图中坐标 (x, y) 处的像素值。当中心深度平面位置发生变化时, 像素偏移量 Δq 随之变化。

计算生成所有投影角度的视差图像, 并采用像素映射算法对其进行重新分配, 生成微图像阵列, 微图像阵列表示为 $E(x, y)$, 其满足:

$$E(x, y)=\left(\frac{p}{\Delta r}\right)^2 \cdot \sum_{i, j} \sum_{m, n} I_\theta\left(\frac{p \cdot m}{\Delta r}+i, \frac{p \cdot n}{\Delta r}+j\right) \cdot \delta\left(x-\frac{p \cdot m}{\Delta r}-i, y-\frac{p \cdot n}{\Delta r}-j\right) \quad (6)$$

式中: m, n 代表图像元在水平方向和垂直方向上的索引。另外, 在微图像阵列的生成过程中已经做了深度反转的变换。

在视差图的生成过程中, 不同投影角度的视差图生成是彼此独立的, CUDA 启动与彩色纹理图像像素点数量相同的线程进行并行计算。同样, 在微图像阵列的生成过程中, 采用 CUDA 进行多线程并行计算。之后, 将获得的微图像阵列在 GPU 中渲染并显示在集成成像显示器上。

2 实验

为了证明所提系统的可行性, 采用 STEREO LABS 公司的双目立体相机 ZED 对 3D 场景进行拍摄, 获

取左右两个视点的视差图像, 其中 3D 场景的主体是盆栽, 实验装置如图 3 所示。集成成像系统参数和实验环境见表 1。

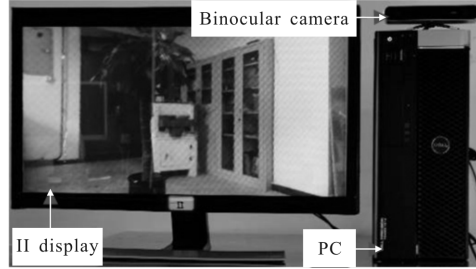


图 3 实验装置示意图

Fig.3 Schematic of experimental setup

表 1 集成成像系统结构参数和实验环境

Tab.1 Configuration parameters and experiment environment of integral imaging system

Item	Parameter	
Binocular camera parameters	Camera resolution	1 280 pixel×720 pixel
	Frames per second	60
	Stereo baseline	120 mm
PC parameters	GPU	NVIDIA GTX 750
	CPU	Intel Core i5-4590
	Memory	8 GB
Integral imaging display parameters	Elemental image array resolution	1 920 pixel×1 080 pixel
	Elemental image size	9 pixel×9 pixel
	Gap	$g=3$ mm
Central depth plane	Micro-lens pitch	$p=1.78$ mm
	d_c	3 m

图 4(a)和图 4(b)分别为双目立体相机获取的左右视差图, 图 4(c)为计算生成分辨率为 1 280×720 的深度图, 其像素数目约是 Kinect2 获取深度图像素数目的 4.25 倍。在所提系统中, 深度图通过在 GPU 上并行计算生成, 深度图的计算以左视差图为准进行, 所得深度图与左视差图对齐。



图 4 3D 场景的左视差图(a)、右视差图(b)和深度图(c)
Fig.4 Left view(a), right view(b) and depth image(c) of 3D scene

根据集成成像显示参数,采用 CUDA 在 GPU 中并行计算生成不同投影角度的视差图像,如图 5 所示。图 5(a)~(c)分别是投影角度为 $(-60^\circ, -60^\circ)$ 、 $(0^\circ, 0^\circ)$ 和 $(60^\circ, 60^\circ)$ 时的视差图,可以看出,盆栽和门把手的距离随着投影角度的变化而变化。

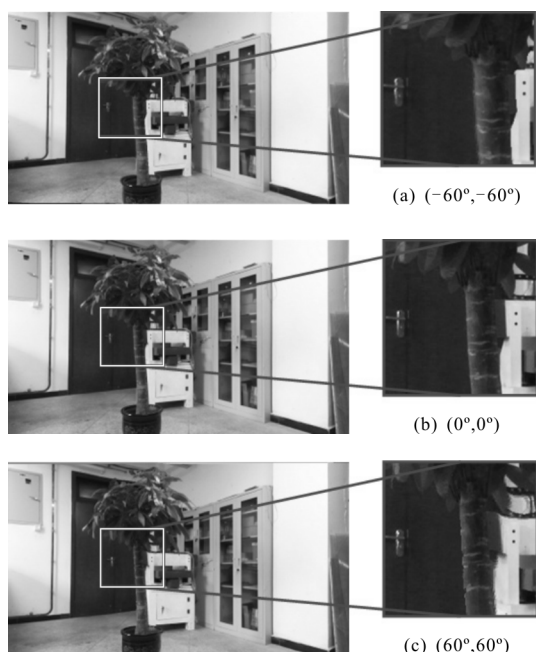
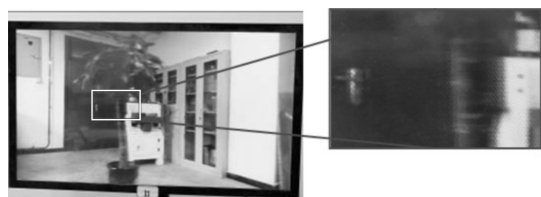
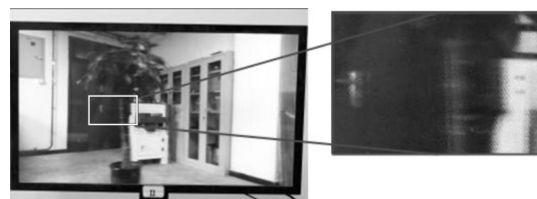


图 5 不同视角下的视差图像
Fig.5 Parallax images of different views

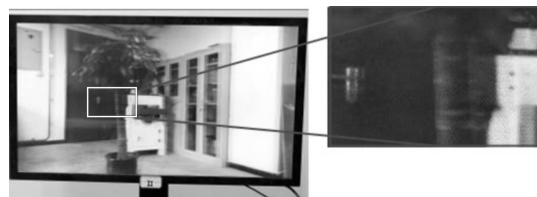
采用像素映射算法,将计算得到的不同投影角度的视差图合成分辨率为 1920×1080 的微图像阵列,在集成成像显示器上进行显示,集成成像显示器上微透镜阵列节距 $p=1.78\text{ mm}$,微透镜阵列和显示器的间距 $g=3\text{ mm}$ 。不同视角的再现 3D 图像如图 6 所示,盆栽与门把手的视差从左到右逐渐减小。



(a) 左视角再现 3D 图像
(a) Reconstructed 3D image of left view



(b) 正视角再现 3D 图像
(b) Reconstructed 3D image of front view



(c) 右视角再现 3D 图像
(c) Reconstructed 3D image of right view

图 6 不同视角的再现 3D 图像
Fig.6 Reconstructed 3D images of different views

在不同视差图数目下生成不同分辨率的微图像阵列时,微图像阵列的生成帧率与视差图数目及微图像阵列分辨率的关系如图 7 所示。可以看出,当系统运行在分辨率 1920×1080 、视点数 9×9 时,微图像阵列的生成帧率为 17 fps,能够实现 3D 场景的实时拍摄与显示。通过分析可知,系统的处理瓶颈主要在于 GPU 并行计算过程中的不同视角视差图生成阶段,随着集成成像显示器分辨率和微透镜阵列节距的增大,待生成的视差图数目及微图像阵列分辨率随之增大,微图像阵列的生成帧率相应减小。在未来的工作中将进一步优化集成成像显示器的参数和微图像阵列的生成流程,提高系统处理速度,实现更高分辨率的集成成像实时拍摄与显示。

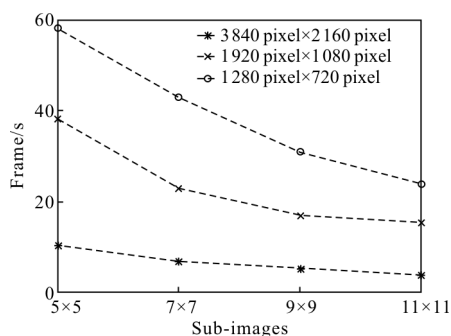


图 7 不同微图像阵列分辨率和视差图数量下的帧率
Fig.7 Frame per second with different elemental image array's resolution and size of parallax images

3 结 论

提出了一种实时的集成成像拍摄系统。该系统采用 CUDA 多线程并行计算技术在 GPU 中进行高分辨率深度图、视差图和微图像阵列的生成,提高了系统的数据处理速度,且在得到微图像阵列后不传输回 CPU,直接在 GPU 中渲染显示,进一步提高了系统的运行速度。该系统具有结构简单,获取的微图像阵列的分辨率高的特点,实现了真实 3D 场景的实时拍摄。

参考文献:

- [1] Lippmann G. La photographie intégrale [J]. *CR Acad Sci*, 1908, 146: 446-451.
- [2] 王琼华. 3D 显示技术与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] Xiong Zhaolong, Wang Qionghua, Xing Yan, et al. Active integral imaging system based on multiple structured light method[J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27094-27104.
- [4] Deng Huan, Wang Qionghua, Li Dahai. Method of generating orthoscopic elemental image array from sparse camera array [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(6): 31-33.
- [5] Deng Huan, Li Shuli, Wu Fei, et al. Toed-in integral imaging with enhanced 3D viewing angle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 1-6. (in Chinese)
邓欢, 李述利, 吴非, 等. 增大 3D 观看视角的会聚式集成成像[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 1-6.
- [6] Taguchi Y, Koike T, Takahashi K, et al. TransCAIP: A live 3D TV system using a camera array and an integral photography display with interactive control of viewing parameters [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2009, 15(5): 841-852.
- [7] Jiao Xiaoxue, Zhao Xing, Yang Yong, et al. Pick-up system for three-dimensional integral imaging with camera array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1653-1660. (in Chinese)
焦小雪, 赵星, 杨勇, 等. 基于相机阵列的三维集成成像记录系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1653-1660.
- [8] Jiao Xiaoxue, Zhao Xing, Yang Yong, et al. Dual-camera enabled real-time three-dimensional integral imaging pick-up and display[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27304-27311.
- [9] Li G, Shin G H, Jeong J S, et al. Simplified integral imaging pickup method for real objects using a depth camera [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2012, 16(4): 381-385.
- [10] Martinezcorral M. Full parallax three-dimensional display from Kinect v1 and v2 [J]. *Optical Engineering*, 2016, 56(4): 041305.
- [11] Kwon K C, Erdenebat M U, Piao Y, et al. Development of a real-time integral imaging display system based on graphics processing unit parallel processing using a depth camera[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(53): 015103.
- [12] He Xiaowei, Chen Zheng, Hou Yuqing, et al. Graphics processing units-accelerated solving for simplify spherical harmonic approximation model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0624002. (in Chinese)
贺小伟, 陈政, 侯榆青, 等. 简化球谐近似模型的图形处理器加速求解 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0624002.
- [13] Zhang Zuoyu, Liao Shouyi, Zhang Jincheng, et al. Real-time battlefield smoke IR simulation based on physical model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0404004. (in Chinese)
张作宇, 廖守亿, 张金城, 等. 基于物理模型的战场烟幕实时红外仿真[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0404004.
- [14] Park K S, Min S W, Cho Y. Viewpoint vector rendering for efficient elemental image generation [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2007, 90(1): 233-241.
- [15] Kwon K C, Park C, Erdenebat M U, et al. High speed image space parallel processing for computer-generated integral imaging system [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 732-740.