

基于元素图像阵列采样的集成成像重构方法

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 高质量的集成成像系统需要采集和存储大量图像数据。提出了一种新的计算机重构方法,可以减少集成成像系统显示端在计算机重构时所需要使用的数据量。传统的计算机重构方法要利用每个元素图像,而此方法对 CCD 相机采集的元素图像阵列进行周期采样,仅利用被采样的元素图像即可重构出多视点图像。这种方法充分利用集成成像中邻近的元素图像中具有匹配像素的特点,将未被采样的元素图像信息由邻近的被采样的元素图像中的匹配像素替代,从而减少了重构过程中使用的数据量,这给不同性能的集成成像显示端带来很大的灵活性,降低了对存储空间和传输带宽的要求。

关键词 集成成像;计算机重构;元素图像;采样;匹配像素

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0511003

Computational Reconstruction for Integral Imaging with Sampled Elemental Images

Wang Yu Piao Yan

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

Abstract High-quality integral imaging (II) system requires collecting and storing large amounts of image data. To reduce the amount of data demanded by II display part during computational reconstruction, a novel computational reconstruction method is proposed. Conventional computational reconstruction needs to use each elemental image. However, in the proposed method, elemental images array recorded by CCD camera are periodically sampled, and multiple view images can be reconstructed by only utilizing the sampled elemental images. This method makes full use of the matching pixel for the adjacent elemental images in integral imaging. Therefore, the unsampled elemental image information can be replaced by the matching pixel in the sampled elemental images to reconstruct multiple view images. Thus, the amount of data required for reconstruction can be reduced by using this proposed method, which can provide flexibility for II display part with different performances, and reduces the requirements for the storage capacity and transmission bandwidth for integral images.

Key words integral imaging; computational reconstruction; elemental image; sampling; matching pixel

OCIS codes 100.3010; 110.3010; 110.6880

1 引 言

近年来,随着科学技术日新月异的进步,立体显示技术获得了长足的发展^[1-3]。其中,三维(3D)集成成像技术(II)是一种通过微透镜阵列来记录和显示全真的三维场景的三维图像技术。由于它具有全视差、连续视点、无需相干光源和其他辅助观看设备

等优点,引起了三维技术领域的广泛关注^[4-8]。

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^[9],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。三维集成成像按显示设备的不同,可以分为全光学

收稿日期: 2013-12-05; **收到修改稿日期:** 2014-01-06

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

集成成像(OII)和计算集成成像(CII)。CII合成的三维图像在质量上优于OII,因为该方法克服了光学设备的物理限制等问题,还能利用多种数字图像处理技术提高重构图像的质量。

为了形成高分辨率的集成图像,采集过程中需要获得很大的数据量,在实际应用中,其存储、传输过程需要较大的存储容量和较高的传输带宽。因此,迫切需要研究减少II图像数据量的方法。目前人们已经开始进行关于集成图像数据压缩算法的研究^[10-11]。如果能够在CII的重构过程中减少重构所使用的数据量,再采用其他集成图像数据压缩技术,这将使显示端需要存储和传输的数据量进一步减少,对于推动II技术的实际应用具有重要意义。

提出一种基于元素图像阵列采样的CII方法,该方法充分利用集成成像中相邻元素图像具有部分匹配像素的特点,在计算机重构时对CCD相机采集

的元素图像阵列进行周期性采样,仅利用采样的元素图像即可重构出不同视点图像,减少了计算机重构过程中所使用的数据量。这种方法可以将使用的数据量减少到原始数据的 $1/N^2$ (设采样周期为 N),然后再对这部分数据采用常见的图像压缩技术进行数据压缩,可以进一步减少图像数据量。

2 三维集成成像的工作原理

II系统包括采集和显示两部分,如图1所示^[12]。在采集部分,物体通过微透镜阵列成像,每个微透镜形成一幅缩小的二维(2D)图像,称为元素图像(EI),有多少个微透镜就有多少个相应的元素图像,这些元素图像再通过一个高清晰CCD相机成像,II系统采集得到的是一幅2D的元素图像阵列图像。

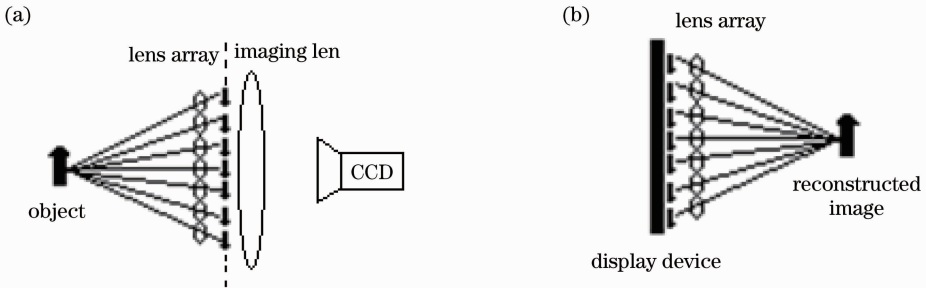


图1 II系统的采集和显示。(a)采集;(b)显示

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

II系统的显示部分也就是重构过程,即利用采集的元素图像阵列重构出原始的3D物体,是与采集相反的过程。按显示的不同,分为OII和CII。OII是将采集的元素图像阵列置于显示面板上,通过与采集微透镜阵列具有同样参数的显示微透镜阵列的光线还原,再现原来的三维光学场景。CII是利用计算机建立模拟的光学成像系统,从采集的元素图像阵列中提取3D信息,通过计算机合成,形成3D图像。

通常的CII方法^[13-14]都是在重构时利用了每个元素图像中的数据,本文设计的方法只利用被采样的元素图像进行计算机重构,从而减少重构所使用的数据量。

3 元素图像阵列采样的CII

3.1 传统CII

通常的CII方法都是从某一观察点出发,在每个元素图像中提取一个该观察点对应的像素点的信

息,通过计算机重构图像技术,将其合成一幅某观察点的重构图像。

图2为计算机重构的光线追踪原理示意图, EIP 为元素图像平面, EIP 与微透镜阵列之间的距离为 g ,微透镜焦距为 f ,观察点 D 与微透镜阵列之间的距离为 L 。

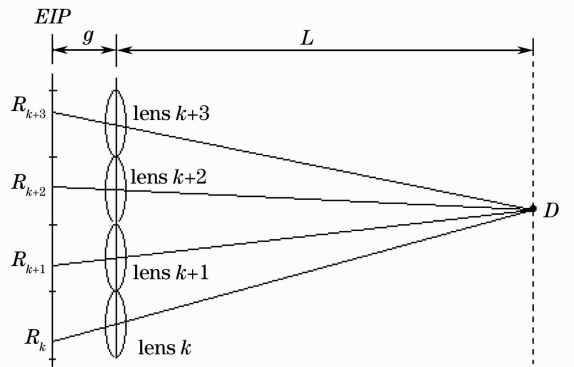


图2 光线追踪示意图

Fig. 2 Ray diagram for extracting pixel observed

根据光线追踪原理可知,从观察点 D 出发,经过第 k 个微透镜中心的直线与 EIP 平面相交于 R_k , 经过第 $k+1$ 个微透镜中心的直线与 EIP 平面相交于 R_{k+1} , 以此类推。依次从每个元素图像的 R_k, R_{k+1} 等位置提取出一个对应像素, 就重构出某个视点的图像。该方法重构的图像分辨率与元素图像的个数是一样的。

如果在重构时, 只从其中一部分元素图像中提取相应像素, 则可以减少重构过程所使用的数据量。例如, 在图 2 中, 假设每三个元素图像中采样一个元素图像, 只利用这个被采样元素图像的数据进行重构, 即第 k 、第 $k+3$ 个元素图像中的像素直接提取, 而第 $k+1$ 、第 $k+2$ 个元素图像中的像素, 根据 II 系统中邻近元素图像间具有部分匹配信息的特性^[15], 从第 k 或第 $k+3$ 个元素图像中提取该像素的匹配像素来代替, 也可以完成某幅视图的重构。这种方法的关键是如何找到邻近元素图像间的匹配像素位置。

3.2 邻近元素图像的匹配像素

在 II 系统中, 由于每个微透镜都从不同的方向记录一部分物体空间, 所以物空间任意一点会经过多个微透镜在 EIP 上形成投影像素, 这样, 该物点的视差信息就被分散地记录于多个元素图像中, 在 EIP 上形成的这些投影像素被称为是匹配像素^[15]。图 3 为 II 系统的采集过程示意图, 直角坐标系的设置如图, 微透镜焦距为 f , 间隔为 P 。

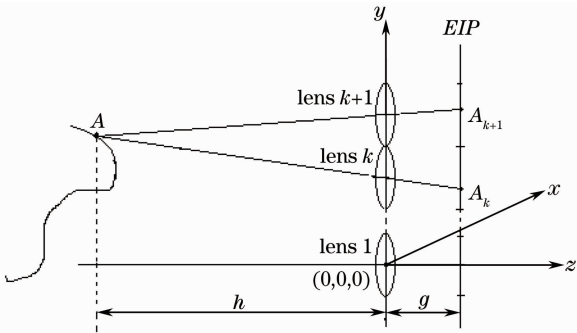


图 3 物点经不同微透镜形成匹配像素

Fig. 3 Matching pixel of the object point through microlens

设定微透镜阵列中微透镜 1 的中心坐标为 $(0, 0, 0)$, 则同一列的微透镜 k 、微透镜 $k+1$ 的中心坐标分别为 $[0, (k-1)P, 0]$ 、 $(0, kP, 0)$ 。在三维物体上任意取点 A , 经过采集微透镜阵列在元素图像阵列上成像为像点。设采集微透镜阵列与 EIP 之间的距离为 g , 点 A 与采集微透镜阵列之间的距离为 h , 点

A 的坐标为 (x_a, y_a, z_a) 。点 A 经微透镜 k 、 $k+1$ 所形成像点的坐标分别表示为 $A_k(x, y, z)$ 、 $A_{k+1}(x, y, z)$ 。根据几何成像和光线追踪原理, 可计算得到这两个像点的坐标为^[16]:

$$A_k: \left\{ \frac{gx_a}{h}, (k-1)P + \frac{g[y_a - (k-1)P]}{h}, g \right\}, \quad (1)$$

$$A_{k+1}: \left\{ \frac{gx_a}{h}, kP + \frac{g[y_a - kP]}{h}, g \right\}, \quad (2)$$

根据上述坐标值可以计算, 点 A 经同一列相邻的两个微透镜所形成的匹配像素点之间的距离 $D_A(x, y, z)$ 为

$$D_A(x, y, z) = \left(0, P + \frac{gP}{h}, 0 \right), \quad (3)$$

又根据成像公式 $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{h}$, 可得

$$D_A(x, y, z) = \left[0, P + \frac{P(g-f)}{f}, 0 \right], \quad (4)$$

由此可知, 物点在相邻元素图像中形成的匹配像素的间距与 k 无关, 当已知某物点在一个元素图像中的像点位置时, 即可根据系统参数计算出其在邻近元素图像中的匹配像素位置。

但是由于光学成像条件限制, 一个物点不会在所有元素图像中都形成匹配像素, 如果某物点能在 N 个元素图像内形成匹配像素, 则需满足^[15]:

$$\frac{P(g-f)N}{f} \leq P, \quad (5)$$

$$N \leq \frac{f}{g-f}, \quad (6)$$

即

$$N_{\max} = \frac{f}{g-f}, \quad (7)$$

根据上式可知, 一个物点最多能在 N_{\max} 个元素图像中形成匹配像素。

3.3 基于元素图像阵列采样的 CII

如果在计算机重构时, 当需要从一个元素图像中提取某像素时, 利用匹配像素原理, 从其他元素图像中提取该像素的匹配像素来代替, 就可以在重构时减少一个元素图像的使用, 从而减少计算机重构时使用的数据量。从这一思路出发, 提出基于元素图像阵列采样的计算机重构方法, 即对采集的元素图像阵列进行周期性采样, 仅利用被采样的这些元素图像进行重构。当需要从未被采样的元素图像中提取像素时, 根据(4)式计算其匹配像素位置, 从被采样的元素图像中提取匹配像素来代替, 完成视图的重构。

如图 2 所示, 设选取采样周期 $N=3$, 被采样的

元素图像为第 $k, k+3$ 等元素图像。在计算机重构时,对于被采样的元素图像,直接提取相应的像素,如像素 R_k, R_{k+3}, \dots ;对于未被采样的元素图像,如像素 R_{k+1}, R_{k+2} 等,则需要根据(4)式计算该像素在第 k 个或第 $k+3$ 个元素图像中的匹配像素位置,从而提取相应的匹配像素。此方法完成的视图重构仅需要利用被采样的元素图像,数据量减少为原始数据的 $1/N^2$, 即 $1/9$ 。

根据(7)式可知,某物点最多能在 N_{\max} 个元素图像中形成匹配像素,所以,利用元素图像阵列采样的 CII 进行重构时所使用的数据量最多可以减少到原始数据量的 $1/N_{\max}^2$ 。

4 实验结果

4.1 实验一:场景中三维物体的表面细节较少

微透镜阵列由 53×53 个方形透镜构成,每个微透镜具有 $1.08 \text{ mm} \times 1.08 \text{ mm}$ 的统一尺寸,即 $P = 1.08 \text{ mm}$,微透镜焦距 f 为 3 mm 。图 4(a)是用于创建 3D 场景的物体图片。图 4(b)所示的是通过光学采集系统捕捉到的用来重构 3D 场景的元素图像阵列,实验中 $g = 3.5 \text{ mm}$ 。

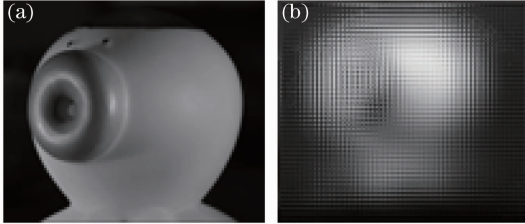


图 4 三维物体与采集的元素图像阵列。(a)三维物体;(b)采集的元素图像阵列

Fig. 4 Three dimensional (3D) object and recorded elemental images array. (a) 3D object; (b) elemental images array

根据(7)式,计算得到 $N_{\max} = 6$ 。实验中分别选取 $N = 3$ 和 $N = 5$,即对采集的元素图像阵列分别以 3、5 为周期进行采样,采样得到的元素图像数为原始元素图像数目的 $1/9, 1/25$ 。

实验中重构了水平方向上四幅不同视点的图像,图 5 为计算机重构实验的结果。每一列代表一个视点图像。每一行是采用不同方法的重构结果,第一行为传统 CII 的重构图像,第二行和第三行为元素图像阵列采样的 CII 的重构图像,第二行为 $N = 3$ 的实验结果,第三行为 $N = 5$ 的实验结果。

从图 5 可以看出,元素图像阵列采样的 CII 能够重构不同视点图像,重构图像分辨率与传统 CII 方法相同,视觉质量虽然有所下降,但不明显。下面

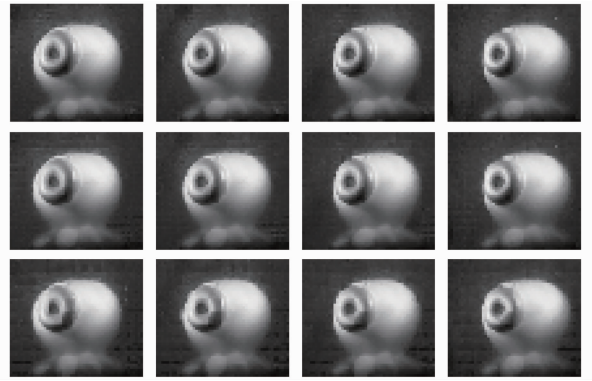


图 5 不同方法的重构结果

Fig. 5 Reconstructed images with different methods
利用两幅图像的均方根误差 e_{rms} 、峰值信噪比 R_{SN} 来客观计算两种方法的重构图像差异。两幅尺寸均为 $A \text{ pixel} \times B \text{ pixel}$ 的图像 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 之间的 $e_{\text{rms}}, R_{\text{SN}}$ 为^[17]

$$e_{\text{rms}} = \left\{ \frac{1}{AB} \sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} [g(x, y) - f(x, y)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \left\{ \frac{f_{\text{max}}^2}{\frac{1}{AB} \sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} [g(x, y) - f(x, y)]^2} \right\}. \quad (9)$$

表 1、表 2 是计算图 5 中重构图像与传统 CII 重构图像之间的 $e_{\text{rms}}, R_{\text{SN}}$ 结果。

表 1 两种方法重构图像的 e_{rms}

Table 1 e_{rms} of the two reconstructed images with different methods

e_{rms}	Image 1	Image 2	Image 3	Image 4
$N = 3$	3.8891	3.8996	3.3837	3.3157
$N = 5$	8.3214	7.8111	7.3666	8.8968

表 2 两种方法重构图像的 R_{SN}

Table 2 R_{SN} of the two reconstructed images with different methods

R_{SN}	Image 1	Image 2	Image 3	Image 4
$N = 3$	36.0217	35.9274	37.1599	37.3006
$N = 5$	29.4148	29.8935	30.4025	28.7275

从表 1 和表 2 的数据可以看出,所提方法重构的图像与传统 CII 重构图像比较接近。随着对元素图像阵列采样周期 N 的增加,所提方法重构图像的 R_{SN} 值会略有下降。这是因为此方法是对元素图像阵列进行周期采样,由于光场分布的影响,邻近的元素图像之间的匹配像素灰度值存在差异,采样周期越大,被采样的元素图像中的匹配像素之间灰度值差异也会加大,将未被采样的元素图像中待提取的像素点利用被采样元素图像中的匹配像素来代替,这样重构的图像与传统 CII 重构图像相比,灰度值

差异就会增加,即 e_{rms} 增加, R_{SN} 下降。

4.2 实验二:场景中三维物体的表面细节丰富

本实验中选择表面细节丰富的三维物体进行计算机重构实验。图 6(a)是用于创建 3D 场景的物体图片。图 6(b)所示的是通过光学采集系统捕捉到的用来重构 3D 场景的元素图像阵列,实验中 $g = 3.9 \text{ mm}$ 。

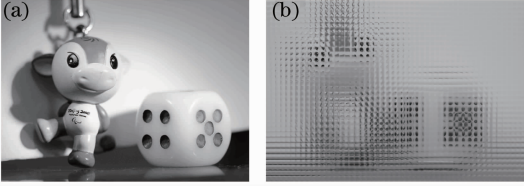


图 6 三维物体与采集的元素图像阵列

Fig. 6 3D object and recorded elemental images

根据(7)式,计算得到 $N_{max} = 3$ 。实验中分别选取 $N=2$ 和 $N=3$,即对采集的元素图像阵列分别以 2、3 为周期进行采样。实验中重构了水平方向上三幅不同视点的图像,图 7 为计算机重构实验的结果。每一列代表一个视点图像。每一行是采用不同方法的重构结果,第一行为传统 CII 的重构图像,第二行和第三行为元素图像阵列采样的 CII 的重构图像,第二行为 $N=2$ 的实验结果,第三行为 $N=3$ 的实验结果。

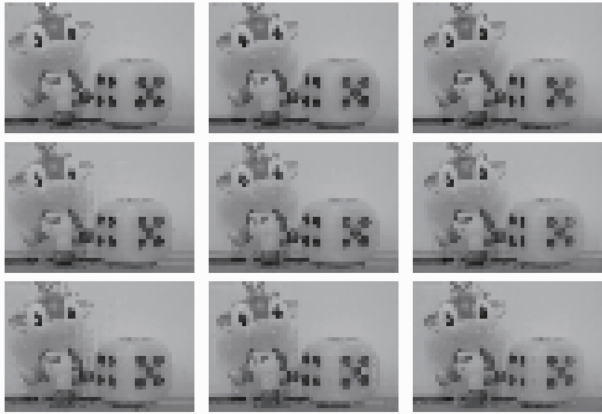


图 7 不同方法的重构结果

Fig. 7 Reconstructed images with different methods

表 3、表 4 是计算图 5 中重构图像与传统 CII 重构图像之间的 e_{rms} 、 R_{SN} 结果。

表 3 两种方法重构图像的 e_{rms}

Table 3 e_{rms} of the two reconstructed images with different methods

e_{rms}	Image 1	Image 2	Image 3
$N=2$	8.2472	5.9317	6.5962
$N=3$	8.1077	6.8857	6.7519

表 4 两种方法重构图像的 R_{SN}

Table 4 R_{SN} of the two reconstructed images with different methods

R_{SN}	Image 1	Image 2	Image 3
$N=2$	29.3860	30.2476	29.2802
$N=3$	29.5342	28.9521	29.0774

从图 7 和表 3、表 4 的数据可以看出,所提方法与传统 CII 重构图像的视觉质量有些差别。对于细节丰富的三维物体,其实验结果的 R_{SN} 数值与细节较少的物体实验相比有所下降,但重构图像的视觉质量与 R_{SN} 值仍在能够接受的范围之内。

4.3 实验三:与采样-插值方法相比较

所提方法是对采样后的元素图像阵列进行像素提取,根据集成成像的光学特性,未被采样的元素图像像素利用采样的元素图像中的匹配像素代替,从而获得与传统方法相同分辨率的重构图像,这与普通的插值方法具有本质的区别。

下面采用元素图像阵列采样加线性插值的方法进行计算机重构实验,即对采集的元素图像阵列进行周期采样,采样后的每个元素图像提取一个像素进行重构,得到低分辨率图像,然后采用线性插值法获得与传统方法相同分辨率的图像。

实验采用图 6(b)的元素图像阵列,进行 $N=2$ 的实验。图 8 为采样-插值法的实验结果,获得的三幅图像与实验二里的视点相同。图 8 中每一列代表一个视点图像,第一行为采样后的每个元素图像中提取一个像素重构得到的低分辨率图像(分辨率为传统方法重构结果的 1/4);第二行为对第一行图像进行线性插值,获得与传统方法相同分辨率的图像;为了方便观察,将基于元素图像阵列采样的 CII 的重构结果(图 7 中第二行图像)放在第三行。

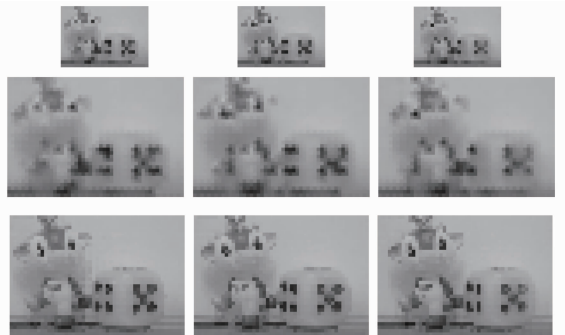


图 8 不同方法的重构结果

Fig. 8 Reconstructed images with different methods

表 5 为图 8 中采样-插值法重构图像与传统 CII 重构图像之间的 e_{rms} 、 R_{SN} 结果。

表 5 采样-插值方法的 e_{rms} 、 R_{SN} Table 5 e_{rms} , R_{SN} with the sample-interpolation method

	Image 1	Image 2	Image 3
e_{rms}	17.0807	15.8330	16.7458
R_{SN}/dB	23.0620	21.7199	21.1879

从图 8 可以看出,利用采样-插值法获得的与传统方法相同分辨率的图像,由于缺少了未被采样的元素图像信息,重构图像细节丢失,视觉质量较差,随着元素图像采样周期加大,视觉质量的劣化将会更加严重。所提方法是利用集成成像的光学特性,将未被采样的元素图像像素用采样的元素图像中的匹配像素代替,而不是简单地数值插值,所以重构图像视觉质量要优于插值法。将表 5 与表 3、表 4 的 e_{rms} 、 R_{SN} 数值进行对比,也会得到同样的结论。

5 结 论

高质量的集成成像系统需要采集和存储大量图像数据。为了减少集成成像系统中存储和传输的数据量,提出了一种基于元素图像阵列采样的计算机重构方法,利用被采样的元素图像数据即可重构出多视点图像,并且计算重构图像的视觉质量仍在能够接受范围之内。这种方法减少了计算机重构时使用的数据量,再结合其他常用的图像数据压缩技术,可以使集成成像显示端需要存储的数据量大大降低,这给不同性能的显示端带来了很大的灵活性,方便集成图像的存储和传输,从而进一步拓宽了集成成像技术的应用领域。

参 考 文 献

- Xia Zhenping, Li Xiaohua, Cui Yuan, *et al.*. Crosstalk analysis and cancellation method study in stereoscopic displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1012002.
夏振平, 李晓华, 崔 渊, 等. 眼镜式立体显示中的串扰分析及消除方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1012002.
- Wang Fang, Li Da, Zhao Xing, *et al.*. Study on the stereo depth of integral imaging three-dimensional display system [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s109002.
王 芳, 黎 达, 赵 星, 等. 集成成像三维显示系统立体深度的研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s109002.
- Dai Zhihua, Xu Yuping, Bu Jing, *et al.*. Light field microscope to achieve three-dimensional real-time naked-eye display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022005.

- 戴志华, 徐于萍, 步 敬, 等. 光场显微镜实现裸眼三维实时显示[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1022005.
- S Sawada, H Kakeya. Integral volumetric imaging using decentered elemental lenses [J]. *Opt Express*, 2012, 20(23): 25902-25913.
- D H Shin, C W Tan, B G Lee, *et al.*. Resolution-enhanced three-dimensional image reconstruction by use of smart pixel mapping in computational integral imaging [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(35): 6656-6665.
- Yang Dingding, Wang Xiaorui, Yang Chen, *et al.*. Reconstruction of three-dimensional information in integral imaging system [J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(5): 102-106.
杨钉钉, 王晓蕊, 杨 琛, 等. 三维集成成像系统中物体三维信息重建方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2012, 39(5): 102-106.
- M Cho, B Javidi. Computational reconstruction of three-dimensional integral imaging by rearrangement of elemental image pixels [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(2): 61-65.
- M Cho, B Javidi. Free view reconstruction of three-dimensional integral imaging using tilted reconstruction planes with locally nonuniform magnification [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(9): 345-349.
- G Lippmann. La photographie integrale [J]. *Comptes Rendus Acad Sci*, 1908, 146: 446-451.
- E Elharar, Adrian Stern, Ofer Hadar, *et al.*. A hybrid compression method for integral images using discrete wavelet transform and discrete cosine transform [J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(3): 321-325.
- S Yeom, A Stern, B Javidi. Compression of 3D color integral images [J]. *Opt Express*, 2004, 12(8): 1632-1642.
- 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.
- Piao Yan, Wang Yu. Non-periodic reconstruction technique of computational integral imaging [J]. *Journal of Information and Computational Science*, 2008, 5(3): 1259-1264.
- H Arimoto, B Javidi. Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(3): 157-159.
- Piao Yan. Imaging reconstruction technique based on tridimensional pixel mapping [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 37(12): 2560-2563.
朴 燕. 基于立体像素匹配的图像重构技术研究[J]. *光子学报*, 2009, 37(12): 2560-2563.
- Jiao Xiaoxue. Study of Optical Pick-Up System on Integral Imaging Three-Dimensional Display Technology [D]. Tianjin: Nankai University, 2012. 23-25.
焦小雪. 集成成像三维显示技术中光学记录系统的研究[D]. 天津: 南开大学, 2012. 23-25.
- Zhang Yujin. Image Processing and Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 138-139.
章毓晋. 图像处理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 138-139.

栏目编辑: 张浩佳