

基于元素图像拼接的集成成像计算重构

王宇*, 杨金晓, 刘乐, 朴燕

长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对集成成像技术视角窄的问题,提出了一种在集成成像计算重构中增大视角的方法。根据集成成像原理,利用相邻元素图像之间的相似性,对相邻元素图像单元进行配准、拼接,扩大每个微透镜对应的元素图像区域,以减少重构时所提取像素超过元素图像区域的情况发生,从而扩大了计算重构完整 3D 图像的视角。相比传统方法,本文方法在观看方向偏离光轴较大,超过传统视角一定范围时,元素图像也可以通过对应的微透镜进行正确合成,但由于计算重构时增加了相邻元素图像的配准、拼接过程,因此计算时间有所增加。

关键词 图像处理; 集成成像; 计算重构; 视角; 元素图像拼接

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1110001

Computational Reconstruction of Integral Imaging Based on Elemental Images Stitching

Wang Yu*, Yang Jinxiao, Liu Le, Piao Yan

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

Abstract We propose a method for increasing the viewing angle during the computational reconstruction of integral imaging to solve the problem of narrow viewing angle during integral imaging. Initially, the adjacent elemental image units are aligned and stitched for enlarging the elemental image region corresponding to each microlens based on the integral imaging principle and similarity of the adjacent elemental images. When compared with the traditional method, the proposed method can accurately integrate elemental images by using the corresponding microlens when the viewing direction considerably deviates from the optical axis and exceeds a certain range of traditional perspective. However, because of the addition of image registration and stitching of adjacent elemental images during computational reconstruction, the calculation time increases.

Key words image processing; integral imaging; computational reconstruction; viewing angle; elemental image stitching

OCIS codes 100.2000; 100.6890; 100.3010

1 引言

目前,裸眼 3D 显示技术的发展备受期待。其中,集成成像(II)以其全视差、连续视点、无视疲劳等多项优点得到了广泛关注^[1-4]。集成成像系统包括采集和显示两部分:采集阶段通过微透镜阵列采集具有不同透视信息的 2D 子图(称为元素图像集合),元素图像集合可以用光学方式采集,也可以计算机生成;显示阶段有光学重构和计算重构两种方法。光学重构方法采用具有同样参数的微透镜阵列显示 3D 图像;计算重构方法利用计算机建立模拟

的光学成像系统,从采集的元素图像集合中提取 3D 信息,通过计算机合成形成 3D 图像,它不受光学器件等物理因素引起的图像质量退化的影响,能够得到较好的重构效果。

集成成像技术优势明显,但也存在视角窄、景深有限、分辨率低等问题。窄视角是影响集成成像达到商用水平的一个重要因素。近几年改善视角问题的相关研究已有很多^[5-12]。Kim 等^[7]利用弯曲的透镜阵列代替传统的平面透镜阵列扩大视角;Park 等^[8]利用跟踪系统定位观察者的位置变化,动态显示元素图像集合,使观察者始终处于观察区域的中心位置,扩

收稿日期: 2019-05-17; 修回日期: 2019-07-02; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(60977011)、吉林省科技计划(20180201091GX)、吉林省机器视觉智能装备与智能检测科技创新中心项目(20180623039TC)

* E-mail: muxie2002@126.com

大了视角;Baasantseren 等^[9]使用两个元素图像掩模增大系统可视角度;Alam 等^[10]利用定向投影与元素图像尺寸调整相结合来控制观察区域,增大视角。邓欢等^[11]采用元素图像节距大于微透镜节距的会聚式集成成像系统进行实验,该系统可使每个微透镜的观看视角互相会聚,从而增大了集成成像的 3D 观看视角。Zhang 等^[12]设计了具有同心对称结构的同心透镜阵列,有效增大了集成成像的显示视角。上述方法在光学重构时均获得了增大视角的效果,但都需要改变传统集成成像系统的硬件结构。针对计算重构的视角问题,本文在不改变传统集成成像采集装置的基础上,对采集的每个元素图像,利用相邻的元素图像与其进行拼接,通过扩大每个微透镜对应的元素图像区域,扩大计算,重构完整 3D 图像的视角。

2 集成成像的视角分析

集成成像系统的一个主要缺点是视角窄,视角即观察者能够看到集成成像重构的完整图像的角度。集成成像重构产生的 3D 图像具有一定的视角范围。因为在传统的集成成像系统中,元素图像与微透镜的尺寸相当,在元素图像集合中,每个元素图像区域被其相邻的元素图像区域严格限制,也就是每个微透镜对应的元素图像区域是有限的。只有通过微透镜观看其对应的元素图像区域,才能观看到正确的 3D 视图。如果观看方向偏离光轴过大,即超过视角范围,元素图像就不能通过正确的微透镜进行合成,也就是观看到的元素图像像素是通过其对应微透镜的相邻微透镜合成的,这时会出现 flipping 现象,flipping 现象是进行视角分析时必须考虑的因素。图 1 中,观察者 1 看到的是完整的 3D 图像,观察者 2 看到的就是 flipping 图像。

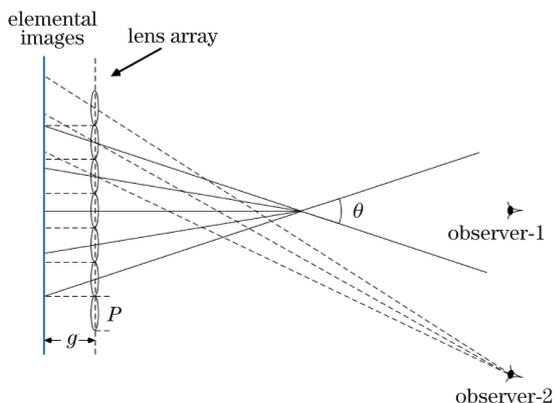


图 1 集成成像视角分析

Fig. 1 Analysis of viewing angle in integral imaging

因此,传统的集成成像显示视角的限制是由元素图像区域大小固定导致的,也就是固定的元素图像区域限制了两条最远光线间的角度。集成成像的最大视角^[13]为

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{P}{2g}\right), \quad (1)$$

式中: g 是微透镜阵列和元素图像集合之间的距离; P 是微透镜孔径。

3 基于元素图像拼接的计算重构方法

3.1 利用光线追踪原理的计算重构

传统的计算重构方法^[14]根据光线追踪原理,利用计算机建立模拟的光学成像系统,从采集的元素图像集合中提取信息,形成 3D 图像。如图 2 所示,假设观察者位于 D 点,与微透镜阵列之间的距离为 L ,从 D 点出发,经过每个微透镜,可以确定从对应的元素图像中提取像素的位置,从而重构出该视点图像。

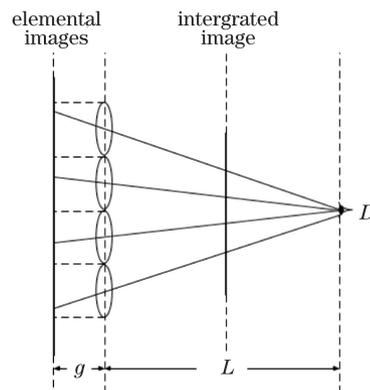


图 2 基于光线追踪的计算重构原理

Fig. 2 Principle of computational reconstruction based on light tracing

在基于光线追踪的计算重构方法中,如果在经过某个微透镜对应的元素图像中提取的像素位置,超出了与该微透镜对应的元素图像区域,就会在相邻的元素图像中提取像素,重构的 3D 图像将不正确。因此,如果能够扩大每个微透镜对应的元素图像区域,就会减少 flipping 现象的出现,从而扩大计算重构的视角。

3.2 相邻元素图像的拼接

根据集成成像原理,相邻微透镜会形成交叉重叠的区域。在元素图像集合中,元素图像单元之间视点连续,且相邻视点之间的差异较小。本研究提出利用相邻元素图像之间的相似性,对相邻元素图像进行配准、拼接,从而扩大每个微透镜对应的元素

图像区域。

以水平方向扩大每个元素图像区域为例,对于同一行上相邻的三个元素图像,以中间的元素图像为基准图像,分别与其两侧的元素图像配准、拼接,过程如图3所示。设元素图像集合与微透镜阵列之间的距离为 g ,集成图像平面与微透镜阵列之间的距离为 l 。

设采集的元素图像集合由 $M \times N$ 个元素图像

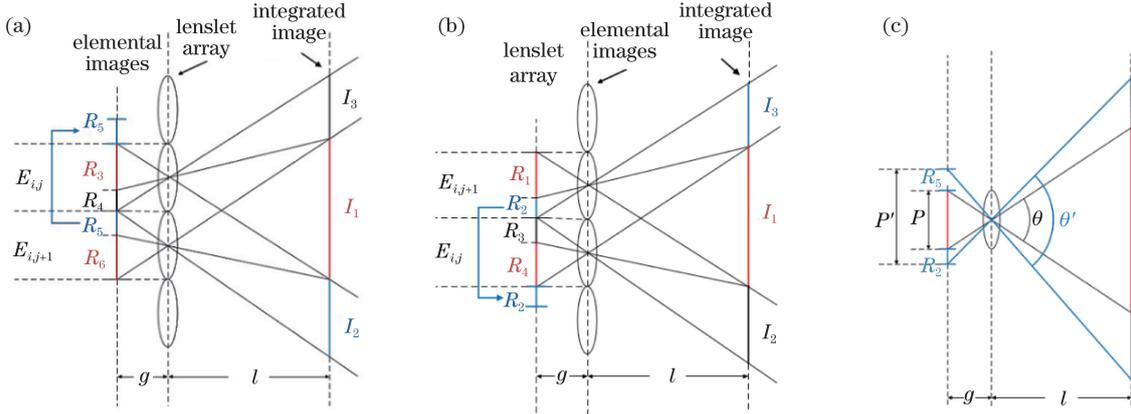


图3 相邻元素图像拼接。(a) $E_{i,j}$ 与 $E_{i,j+1}$ 拼接;(b) $E_{i,j}$ 与 $E_{i,j-1}$ 拼接;(c) 拼接后的 $E_{i,j}$

Fig. 3 Stitching of adjacent elemental images. (a) Stitching of $E_{i,j}$ and $E_{i,j+1}$;
(b) stitching of $E_{i,j}$ and $E_{i,j-1}$; (c) stitched $E_{i,j}$

进行图像配准时,采用的配准窗口大小为 $m \times \omega$ 个像素。假设对 $E_{i,j}$ 和 $E_{i,j+1}$ 进行图像配准,在 $E_{i,j}$ 中选取 ω 列像素作为基准子图,在 $E_{i,j+1}$ 中寻找其匹配位置。采用平均误差平方和(MSD)算法作为两幅子图像相似度的测量标准,两幅子图像相似度的测量函数表达式为

$$D(t) = \frac{1}{m \times \omega} \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^{\omega} [E_{i,j}(p, q) - E_{i,j+1}(p, q + t - 1)]^2, \quad (2)$$

式中: $1 \leq t \leq n - \omega + 1$; p, q 为子图像的像素坐标; $E_{i,j}(p, q)$ 为该点的像素值。

只需找到最小的 $D(t)$,即可确定 $E_{i,j+1}$ 中与基准子图匹配的位置。然后根据匹配位置 t ,将 $E_{i,j+1}$ 中的 R_5 区域与 $E_{i,j}$ 进行拼接,如图3(a)中箭头指示。

同理,如图3(b)所示,经过 $E_{i,j}$ 和 $E_{i,j-1}$ 的图像配准,将 $E_{i,j-1}$ 中的 R_2 区域与 $E_{i,j}$ 拼接,如图3(b)中箭头指示。 $E_{i,j}$ 分别与 $E_{i,j-1}$ 、 $E_{i,j+1}$ 完成图像配准、拼接后的结果如图3(c)所示,扩大了元素图像 $E_{i,j}$ 的区域。

设拼接后元素图像的宽度为 P' , R_5 区域的宽度为 h_1 , R_2 区域的宽度为 h_2 ,则

组成,每个元素图像有 $m \times n$ 个像素,第 i 行第 j 列的元素图像表示为 $E_{i,j}$,与其相邻的两幅元素图像分别表示为 $E_{i,j-1}$ 、 $E_{i,j+1}$ 。如图3(a)所示,每个元素图像分别经过对应的微透镜形成集成图像。元素图像 $E_{i,j}$ 中的区域 R_3 和 $E_{i,j+1}$ 中的区域 R_6 形成集成图像的 I_1 部分,两个图像区域具有相似性。通过对 $E_{i,j}$ 和 $E_{i,j+1}$ 进行图像配准,即可确定 R_3 和 R_6 两个区域的配准位置。

$$P' = P + h_1 + h_2. \quad (3)$$

根据图3(a)、图3(b)中相似三角形的对应关系,可得

$$h_1 = \frac{Pg}{l}, \quad (4)$$

$$h_2 = \frac{Pg}{l}, \quad (5)$$

由(3)~(5)式可得

$$P' = P + \frac{2Pg}{l}. \quad (6)$$

本方法的最大视角 θ' 为

$$\theta' = 2\arctan\left(\frac{P'}{2g}\right) = 2\arctan\left(\frac{P}{2g} + \frac{P}{l}\right), \quad (7)$$

对比(7)式和(1)式可知,上述方法扩大了水平方向上每个微透镜对应的元素图像区域,水平方向上计算重构完整视图的视角得到了增强。垂直方向上相邻元素图像的配准、拼接原理相同。

本文方法因为增加了相邻元素图像的配准、拼接过程,与传统方法相比,复杂度有一定的增加,随着元素图像数以及每个元素图像中像素数的增多,运算量有所增加。但是所有相邻元素图像的配准过程只需一次,存储的配准结果可以用于其他视角图像的计算重构。另外,根据集成成

像原理可知,相邻元素图像的视差较小,通过限制(2)式中 t 的取值范围可以降低图像配准的运算量。

4 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性,分别利用计算机生成方法和光学采集方法产生元素图像集合,进行计算机重构实验。实验运行环境:主频为 4.2 GHz 的 Intel Core i7-7700K 处理器,安装内存为 8 GB,仿真软件为 MATLAB R2014。

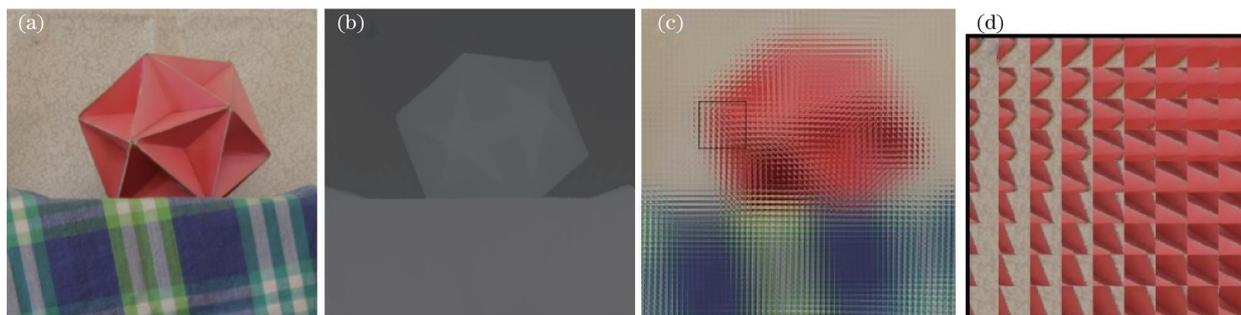


图 4 3D 物体及生成的元素图像集合。(a)彩色图像;(b)深度图像;(c)元素图像集合;(d)局部放大区域

Fig. 4 3D object and generated elemental images. (a) Color image; (b) depth image; (c) elemental images; (d) partially enlarged images

在计算重构过程中,假设观察者距离显示微透镜阵列 500 mm,下面分别采用传统方法和本文方法计算重构不同视点图像。

首先以图 4(c)元素图像集合中第 26 行第 15、16、17 列三个相邻的元素图像为例,说明元素图像

4.1 计算机生成方法获取元素图像集合

根据文献[15]的方法,利用对应的彩色图像和深度图像^[16-17]生成元素图像集合。图 4(a)、(b)为 3D 物体的彩色图像和深度图像。若元素图像集合包括 60 列 \times 60 行元素图像单元,每个元素图像的分辨率为 40 pixel \times 40 pixel,每个微透镜呈方形排列,宽度为 1 mm,焦距为 3 mm。微透镜阵列与元素图像平面之间的距离是 3.3 mm,则生成的元素图像集合如图 4(c)所示。为了观看细节,将局部区域进行放大显示,如图 4(d)所示。

配准、拼接过程。图 5(a)~图 5(c)为水平方向相邻的三个元素图像。以 $E_{26,16}$ 为基准图像,分别完成其与 $E_{26,15}$ 、 $E_{26,17}$ 的配准、拼接,拼接结果如图 5(d)所示,与图 5(b)对比可以看出,水平方向上扩大了元素图像 $E_{26,16}$ 的区域。



图 5 $E_{26,16}$ 与 $E_{26,15}$ 、 $E_{26,17}$ 的拼接。(a) $E_{26,15}$; (b) $E_{26,16}$; (c) $E_{26,17}$; (d) 拼接后的 $E_{26,16}$

Fig. 5 Stitching of $E_{26,16}$, $E_{26,15}$, and $E_{26,17}$. (a) $E_{26,15}$; (b) $E_{26,16}$; (c) $E_{26,17}$; (d) stitched $E_{26,16}$

对图 4(c)采用传统方法进行计算重构,水平方向上不同视点重构的图像如图 6 所示,图中正角度表示在右边的拍摄角度,负角度表示在左边的拍摄角度。如果经过某个微透镜提取的像素坐标超过该透镜所对应的元素图像区域,将会错误地在相邻的元素图像中提取像素,导致重构的 3D 视图出现 flipping 现象,如图 6(a)、(e)中椭圆标记所示。

采用本文方法对图 4(c)进行处理,首先对元素图像集合中相邻元素图像进行配准,存储配准数据,

然后采用光线追踪方法计算重构不同视角的图像。如果重构某视角图像时,提取的部分像素坐标超过了对应的元素图像区域范围,则进行相邻元素图像拼接。重构结果如图 7 所示,本文方法重构出了不同视角的正确视图。

表 1 给出了两种方法根据参数计算得到的完整重构 3D 视图的最大视角、计算重构每幅视图的时间,传统方法的计算时间是对图 6(a)~(e)进行计算的时间,本文方法是对图 7(a)~(e)进行计算的

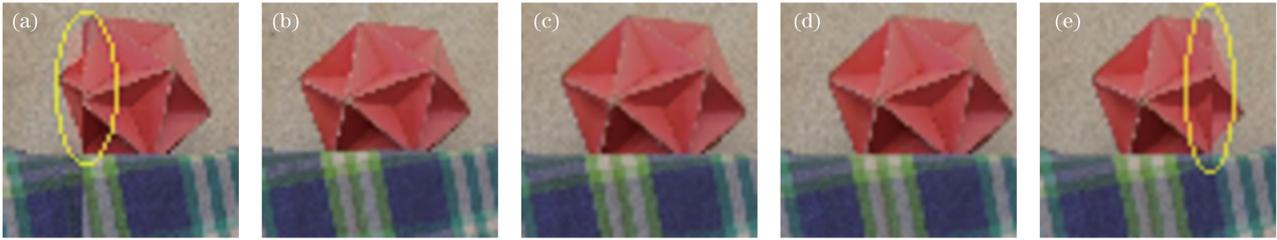


图 6 传统方法计算重构的图像。(a) -10° ; (b) -8° ; (c) 0° ; (d) $+8^\circ$; (e) $+10^\circ$

Fig. 6 Computational reconstructed images obtained by conventional method.

(a) -10° ; (b) -8° ; (c) 0° ; (d) $+8^\circ$; (e) $+10^\circ$

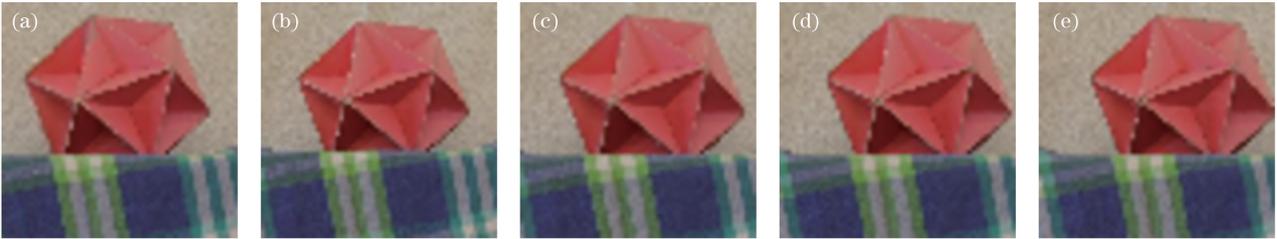


图 7 本文方法计算重构的图像。(a) -10° ; (b) -8° ; (c) 0° ; (d) $+8^\circ$; (e) $+10^\circ$

Fig. 7 Computational reconstructed images obtained by the proposed method.

(a) -10° ; (b) -8° ; (c) 0° ; (d) $+8^\circ$; (e) $+10^\circ$

表 1 两种方法的最大视角及计算时间

Table 1 Maximum viewing angle and computing time of two algorithms

Algorithm	Maximum viewing angle /($^\circ$)	Computed figure	Computing time /s				
			Fig. (a)	Fig. (b)	Fig. (c)	Fig. (d)	Fig. (e)
Conventional method	± 8.6	Fig. 6	0.0010	0.0010	0.0011	0.0011	0.0010
Our method	± 10.3	Fig. 7	0.0185	0.0080	0.0080	0.0081	0.0186

时间。本文方法对所有相邻元素图像进行配准的时间为 0.3476 s,表 1 中的时间为利用配准数据计算重构每幅视图的运行时间。可以看出,与传统计算重构方法相比,本文方法可以在更大的视角范围内计算重构出正确的 3D 图像,但计算时间有所增加。

4.2 光学设备采集方法获取元素图像集合

利用真实 3D 物体和微透镜阵列搭建光学采集系统,获取元素图像集合,3D 物体图像和采集的元素图像集合如图 8 所示。元素图像集合包括 49 行 \times 53 列元素图像单元。每个元素图像的分辨率为 40 pixel \times 40 pixel,微透镜为方形,具有统一尺寸,宽度为 1.08 mm,焦距为 3 mm。微透镜阵列与元素图像平面之间的距离为 3.5 mm。计算重构时,假设观察者距离显示微透镜阵列 500 mm。

对图 8(b)采用传统方法进行计算重构,水平方向上不同视点重构的图像如图 9 所示。图 9(a)、(e)两图出现错误重构,如图中椭圆标记所示。采用本文方法,在相同的 5 个视点重构的结果如图 10 所

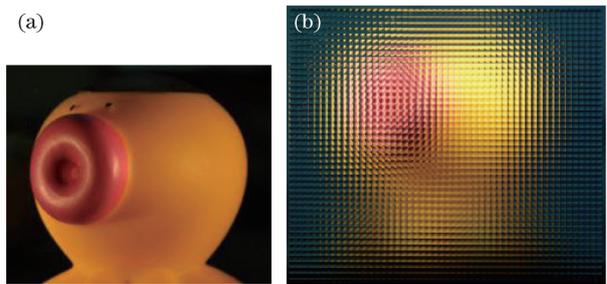


图 8 3D 物体和采集的元素图像集合。

(a) 3D 物体;(b)采集的元素图像集合

Fig. 8 3D object and collected elemental images.

(a) 3D object; (b) collected elemental images

示,分别重构出完整的 3D 视图。

表 2 给出了两种方法根据参数计算得到的完整重构 3D 视图的视角范围及重构每幅视图的时间,传统方法的计算时间是对图 9(a)~(e)进行计算的时间,本文方法是对图 10(a)~(e)进行计算的时间。本文方法中对所有相邻元素图像进行配准的时间为 0.2347 s。表 2 中的时间为利用配准结

果计算重构每幅视图的运行时间。从图 9、图 10 和表 2 数据可以看出,由于光学设备采集元素图像集合时,会受到传感器噪声、元素图像之间交叉

干扰等影响,完整重构 3D 视图的视角与理论值有差距,但是本文方法与传统计算重构方法相比,能够增大视角。

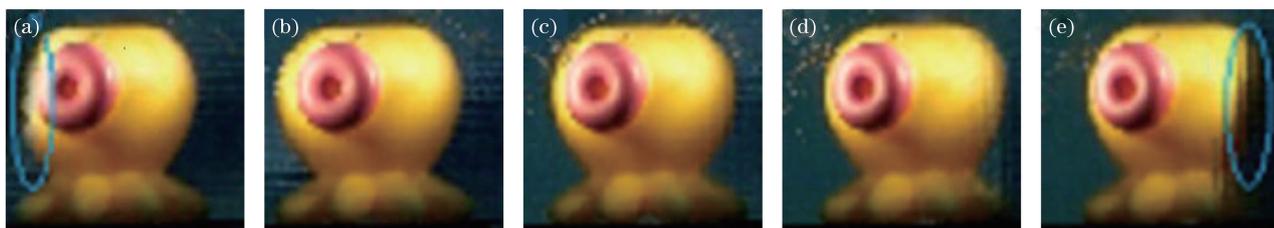


图 9 传统方法计算重构的图像。(a) -10° ; (b) -7° ; (c) 0° ; (d) $+7^\circ$; (e) $+10^\circ$

Fig. 9 Computational reconstructed images obtained by conventional method.

(a) -10° ; (b) -7° ; (c) 0° ; (d) $+7^\circ$; (e) $+10^\circ$

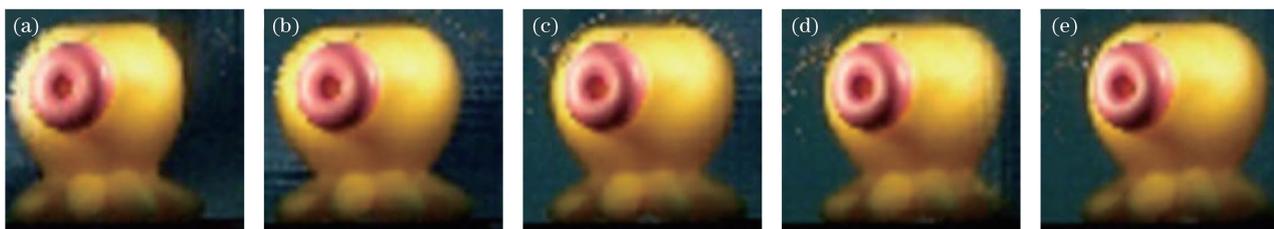


图 10 本文方法计算重构的图像。(a) -10° ; (b) -7° ; (c) 0° ; (d) $+7^\circ$; (e) $+10^\circ$

Fig. 10 Computational reconstructed images obtained by proposed method.

(a) -10° ; (b) -7° ; (c) 0° ; (d) $+7^\circ$; (e) $+10^\circ$

表 2 两种方法的最大视角及计算时间

Table 2 Maximum viewing angle and computing time of two algorithms

Algorithm	Maximum viewing angle /($^\circ$)	Computed figure	Computing time /s				
			Fig. (a)	Fig. (b)	Fig. (c)	Fig. (d)	Fig. (e)
Conventional method	± 8.8	Fig. 9	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009	0.0008
Our method	± 11.6	Fig. 10	0.0166	0.0067	0.0066	0.0066	0.0167

5 结 论

提出一种扩大视角的集成成像计算重构方法。当计算重构所提取的像素超过微透镜对应的元素图像区域时,所提方法通过与相邻元素图像的配准、拼接来扩大该元素图像区域。实验结果表明,本文方法在观看方向偏离光轴较大,超过传统视角一定范围时,可以通过对应的微透镜对元素图像进行正确合成,而不像传统方法一样通过相邻微透镜进行合成,因此能够扩大计算重构完整 3D 视图的视角。相对于传统方法,本文方法由于增加了相邻元素图像的配准、拼接过程,计算时间有所增加。

参 考 文 献

[1] Zhao X W, Wang Y Y, Song L P, *et al.* Underwater target imaging based on computational integral

imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0109001.

赵雪微, 王尧尧, 宋丽培, 等. 基于计算集成成像的水下目标成像[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0109001.

[2] Fan G F, Chen L S, Wei G J, *et al.* Computational reconstruction algorithm for integral imaging based on diffraction tracing[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0511003.

范广飞, 陈林森, 魏国军, 等. 基于衍射追迹的集成成像重构算法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0511003.

[3] Martinez-Corral M, Dorado A, Barreiro J C, *et al.* Recent advances in the capture and display of macroscopic and microscopic 3-D scenes by integral imaging[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(5): 825-836.

[4] Xing S J, Sang X Z, Yu X B, *et al.* High-efficient computer-generated integral imaging based on the backward ray-tracing technique and optical

- reconstruction[J]. *Optics Express*, 2017, 25(1): 330-338.
- [5] Jang J S, Javidi B. Improvement of viewing angle in integral imaging by use of moving lenslet arrays with low fill factor[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(11): 1996-2002.
- [6] Lee B, Jung S, Park J H. Viewing-angle-enhanced integral imaging by lens switching[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(10): 818-820.
- [7] Kim Y, Park J H, Min S W, *et al.* Wide-viewing-angle integral three-dimensional imaging system by curving a screen and a lens array[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(4): 546-552.
- [8] Park G, Jung J H, Hong K, *et al.* Multi-viewer tracking integral imaging system and its viewing zone analysis[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17895-17908.
- [9] Baasantseren G, Park J H, Kwon K C, *et al.* Viewing angle enhanced integral imaging display using two elemental image masks[J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 14405-14417.
- [10] Alam M A, Kwon K C, Piao Y L, *et al.* Viewing-angle-enhanced integral imaging display system using a time-multiplexed two-directional sequential projection scheme and a DEIGR algorithm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 6900214.
- [11] Deng H, Li S L, Wu F, *et al.* Toed-in integral imaging with enhanced 3D viewing angle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 1-6.
- 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.
- [12] Zhang J L, Wang X R, Wu X X, *et al.* Wide-viewing integral imaging using fiber-coupled monocentric lens array[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23339-23347.
- [13] Choi H, Kim Y, Park J H, *et al.* Improved analysis on the viewing angle of integral imaging[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(12): 2311-2317.
- [14] Piao Y, Wang Y. Non-periodic reconstruction technique of computational integral imaging[J]. *Journal of Information and Computational Science*, 2008, 5(3): 1259-1264.
- [15] Li G, Kwon K C, Shin G H, *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.
- [16] Hirschmuller H, Scharstein D. Evaluation of cost functions for stereo matching[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE, 2007: 9738137.
- [17] Scharstein D, Pal C. Learning conditional random fields for stereo[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE, 2007: 9738080.