

文章编号 1004-924X(2014)01-0001-06

## 增大 3D 观看视角的会聚式集成成像

邓欢<sup>1</sup>, 李述利<sup>1</sup>, 吴非<sup>1</sup>, 王攀<sup>1</sup>, 王琼华<sup>1,2\*</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 四川成都 610065;

2. 四川大学视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 四川成都 610065)

**摘要:**提出了一种会聚式集成成像法用于增大其 3D 观看视角。该成像方法包括会聚式集成成像 3D 拍摄和会聚式集成成像 3D 显示两个过程。在 3D 拍摄过程中,各透镜元的 3D 拍摄视角不再是中心对称的,而是根据透镜元在微透镜阵列中所在的位置来设置其 3D 拍摄视角,每个透镜元的拍摄视角分别由上、下、左、右拍摄视角组成。在 3D 显示过程中,设置的参数与 3D 拍摄时的参数完全相同,图像元节距大于透镜元节距,使得每个透镜元的观看视角互相会聚,从而增大了集成成像的 3D 观看视角。模拟实验显示:会聚式集成成像的 3D 视角是常规成像方式的近 3.4 倍,且消除了串扰。实验结果验证了理论推导的正确性。

**关键词:**会聚式集成成像;3D 观看视角;3D 拍摄;3D 显示;串扰

**中图分类号:**TN141 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142201.0001

## Toed-in integral imaging with enhanced 3D viewing angle

DENG Huan<sup>1</sup>, Li Shu-li<sup>1</sup>, WU Fei<sup>1</sup>, WANG Pan<sup>1</sup>, WANG Qiong-hua<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision,  
Sichuan University, Chengdu 610065, China)

\* Corresponding author, E-mail: qhwang@scu.edu.cn

**Abstract:** A toed-in integral imaging method is proposed to increase the three-dimensional (3D) viewing angle of integral imaging. The method contains a toed-in integral imaging 3D pickup process and a toed-in integral imaging 3D display process. In the toed-in 3D pickup process, the shooting angle of each micro-lens is not centrosymmetric anymore, and it is set based on the position of each micro-lens in the micro-lens array. The shooting angle of each micro-lens contains upper, lower, left and right shooting angles. In the toed-in 3D display process, the parameters for the 3D display are the same as the parameters in 3D pickup process and the pitch of the elemental image is larger than that of the micro-lens, by which the viewing angle of each micro-lens is converged together, and the 3D viewing angle is increased. In the simulating experiments, the 3D viewing angle of toed-in integral imaging is about 3.4 times of conventional one, in addition the crosstalk is eliminated as well. The experimental results verify the correctness of the theoretical analysis.

**Key words:** toed-in integral imaging; 3D viewing angle; 3D pickup; 3D display; crosstalk

收稿日期:2013-05-29;修订日期:2013-06-24.

基金项目:国家 973 重点研究发展计划资助项目 (No. 2013CB328802);国家自然科学基金资助项目 (No. 61036008, No. 61225022);国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA011901, No. 2012AA03A301)

## 1 引言

自 1908 年 G. Lippmann 提出集成成像以来<sup>[1]</sup>,该技术以其全视差、连续视点、无视疲劳等多项优点得到了广泛的关注<sup>[2-8]</sup>。集成成像利用微透镜阵列对三维(Three-dimensional, 3D)场景进行记录,并通过相同参数的微透镜阵列再现出 3D 图像。根据光路可逆原理再现出的 3D 图像与原 3D 场景具有相同的色彩、深度等信息,因此集成成像被称为真 3D 显示。3D 观看视角是集成成像 3D 显示的重要性能参数,它是指能看到无裂纹、无跳变、完整的 3D 图像的观看角度,3D 观看视角越大说明观看自由度越大。常规集成成像 3D 显示器主视区的 3D 观看视角非常窄,只有几度到十几度,而且各阶次视区间存在较大的串扰区,这是制约集成成像发展和产业化的一个重要因素。

研究人员在增大集成成像 3D 观看视角方面进行了非常深入和系统的研究,并提出了很多解决方案。韩国首尔国立大学的 Y. Kim 等人提出弯曲微透镜阵列方法来增大集成成像的 3D 观看视角<sup>[9-10]</sup>;韩国忠北国立大学 G. Baasantseren 等人设计了一套宽视角的多层式集成成像 3D 显示系统<sup>[11]</sup>;韩国釜庆国立大学的 J. S. Jang 和美国康涅狄格大学的 B. Javidi 等人提出移动微透镜阵列技术来增大 3D 观看视角<sup>[12]</sup>。这些方法有效地增大了集成成像的 3D 观看视角,但是需要特殊的器件来辅助完成,其结构复杂,成本较高,致使实用性大大降低。作者曾通过单纯增大图像元节距实现会聚式集成成像 3D 显示,以增大 3D 观看视角<sup>[13]</sup>,但该方法中 3D 拍摄和 3D 显示过程不再对应,从而使重建的 3D 图像出现了严重的畸变。本文在改进此方法的基础上,提出了一种包括会聚式 3D 拍摄和会聚式 3D 显示的会聚式集成成像法,在增大 3D 观看视角的同时,避免了畸变的产生。需要说明的是,该方法只是增加集成成像系统无串扰的观看区域,并没有增加单个透镜元的视场角。

## 2 原理

会聚式集成成像法的原理如图 1 所示。它包

含会聚式集成成像 3D 拍摄和会聚式集成成像 3D 显示两个过程,分别如图 1(a)、(b)所示。与常规集成成像法不同,该会聚式集成成像法的图像元节距大于透镜元节距,每个图像元通过其对应透镜元的拍摄和观看视角不是互相平行的,而是会聚在一起的,因此每个透镜元观看视角的公共区域即 3D 观看视角增大了,而非公共区域即串扰减小了。由于会聚式的 3D 拍摄过程与会聚式的 3D 显示过程互为逆过程,根据光路可逆原理,会聚式集成成像法能全真地重建出物体的 3D 图像。

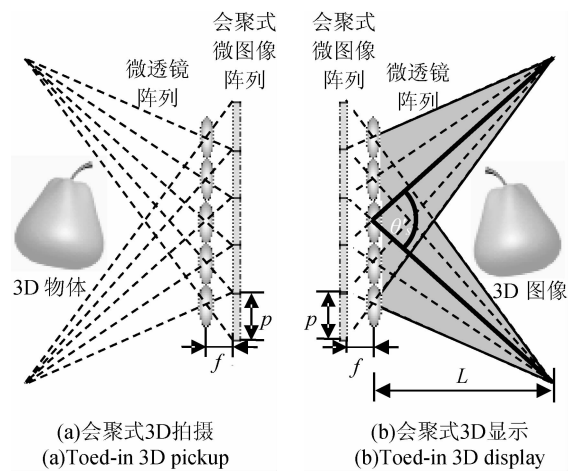


图 1 会聚式集成成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of toed-in integral imaging

### 2.1 3D 拍摄

会聚式集成成像 3D 拍摄如图 1(a)所示,其原理与常规的集成成像 3D 拍摄原理类似,都是通过微透镜阵列对 3D 场景进行 3D 拍摄,并在微透镜阵列的后焦平面上记录下 3D 场景的 3D 信息,以获得微图像阵列。为了区别于常规的微图像阵列,这里将会聚式方法拍摄获得的微图像阵列称为会聚式微图像阵列。设会聚式微图像阵列中图像元的节距为  $p'$ ,其值由下式计算得到:

$$p' = \frac{p(L+f)}{L}, \quad (1)$$

其中: $p$ 和 $f$ 分别为透镜元的节距和焦距, $L$ 为设定的最佳观看距离。由式(1)可知:

$$p' > p, \quad (2)$$

即图像元的节距大于透镜元的节距。

各图像元通过其对应透镜元的 3D 拍摄视角不再是中心对称的,需根据透镜元在微透镜阵列中所在的位置设置其 3D 拍摄视角。如图 2 所

示,微透镜阵列中位于  $m$  列  $n$  行的透镜元的拍摄视角包括水平拍摄视角和垂直拍摄视角。其中,水平拍摄视角由左视角  $\theta_{\text{left } m,n}$  和右视角  $\theta_{\text{right } m,n}$  组成;垂直拍摄视角由上视角  $\theta_{\text{up } m,n}$  和下视角  $\theta_{\text{down } m,n}$  组成。它们分别由下式计算得出:

$$\theta_{\text{left } m,n} = \arctan \left\{ \frac{p'}{2f} + \frac{[\text{ceil}(M/2) - m]p'}{L} \right\}, \quad (3)$$

$$\theta_{\text{right } m,n} = \arctan \left\{ \frac{p'}{2f} - \frac{[\text{ceil}(M/2) - m]p'}{L} \right\}, \quad (4)$$

$$\theta_{\text{up } m,n} = \arctan \left\{ \frac{p'}{2f} - \frac{[\text{ceil}(N/2) - n]p'}{L} \right\}, \quad (5)$$

$$\theta_{\text{down } m,n} = \arctan \left\{ \frac{p'}{2f} + \frac{[\text{ceil}(N/2) - n]p'}{L} \right\}, \quad (6)$$

式中: $M, N$  分别代表微透镜阵列在水平和垂直方向包含的透镜元个数。拍摄时为了避免光线产生记录串扰,可以在微透镜阵列和会聚式微图像阵列之间加入一个栅栏阵列。

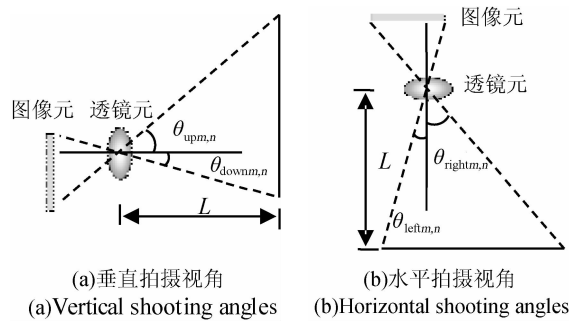


图 2 位于  $m$  列  $n$  行的透镜元的拍摄视角

Fig. 2 Shooting angles of micro-lens in row  $m$  and line  $n$

## 2.2 3D 显示

会聚式集成成像 3D 显示过程如图 1(b) 所示,中心图像元通过对应透镜元的观看视角增大到  $\theta'_s$ :

$$\theta'_s = 2\arctan \left( \frac{p'}{2f} \right). \quad (7)$$

在设定的最佳观看距离  $L$  处,每个图像元透过其对应透镜元的观看视角向中心透镜元的观看视角会聚,如图 1(b) 中的虚线所示,使得整个会聚式集成成像 3D 显示器主视区的 3D 观看视角增大到中心透镜元的观看视角  $\theta'_s$ 。

会聚式集成成像 3D 显示器在一阶视区和二阶视区内的 3D 观看视角分布情况如图 3 所示。图像元上的像素通过对应透镜元、相邻透镜元和相邻第二个透镜元成像,分别形成主视区、一阶视

区和二阶视区,如图 3 所示。一阶视区和二阶视区对称分布于主视区的两侧,各阶次视区间的灰色区域为串扰区。由图 3 可见,会聚式集成成像 3D 显示器中,图像元节距大于透镜元节距,各图像元在某一阶次的观看视角都会聚到中心透镜元在该阶次的观看视角上,使得公共区域即 3D 观看视角增大,而非公共区域即串扰区减小。观看者在任何距离处观看到的 3D 图像完全相同,当观看距离不在设定的最佳观看距离  $L$  处时,虽然其 3D 观看视角会稍微减小,但仍然大于常规集成成像的 3D 观看视角。

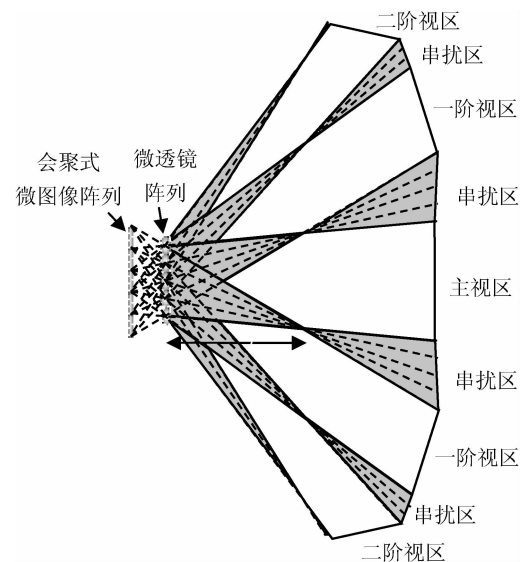


图 3 会聚式集成成像 3D 显示器各阶次视区的分布示意图

Fig. 3 Distribution of viewing zones in toed-in integral imaging 3D display

## 3 实验验证

实验拍摄采用相同的 3D 场景模型,包括“苹果”、“梨子”和“背景”,合成会聚式微图像阵列和常规的微图像阵列,进行会聚式集成成像 3D 显示和常规集成成像 3D 显示实验,并测试两者的 3D 观看视角。实验中微透镜阵列和常规微图像阵列的节距为  $p = 1.27 \text{ mm}$ ,会聚式微图像阵列的节距为  $p' = 1.2776 \text{ mm}$ ,会聚式和常规微图像阵列都包含  $120 \times 120$  个单元,透镜元节距为  $f = 3 \text{ mm}$ ,图像元分辨率为  $r = 30$ ,观看距离为  $L = 500 \text{ mm}$ 。根据式(7)和参考文献[10]中的式(2),

计算得到该会聚式和常规集成成像 3D 显示器的 3D 观看视角的理论值分别为  $\theta' = 24^\circ, \theta = 6.9^\circ$ 。

### 3.1 仿真实验

为了精确地验证 3D 观看视角的大小,本文在计算机中采用基于视点的集成成像 3D 显示方法。首先设定一个虚拟摄像机在确定的最佳距离  $L=500\text{ mm}$  处,从不同角度拍摄会聚式和常规集成成像 3D 显示重建的 3D 图像,获得结果如图 4 和图 5 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。从图 4 中可以看出,会聚式集成成像 3D 显示在  $-12^\circ \sim 12^\circ$  完整地重建出了 3D 图像。由于会聚式集成成像法的观看视角是周期循环排列,且观看者在各阶次视区内观看到的 3D 图像相同,即在  $-13^\circ$  和  $13^\circ$  处的 3D 图像分别与  $12^\circ$  和  $-12^\circ$  的 3D 图像相同,由此说明  $-13^\circ$  和  $13^\circ$  位于下一个视区,即一阶视区,因此在设定的最佳观看距离上,该会聚式集成成像 3D 显示的 3D 观看视角约为  $24^\circ$ ,且相邻阶次视区间没有了串扰。从图 5 可以看出,常规集成成像 3D 显示在  $-3.5^\circ \sim 3.5^\circ$  完整地重建出了 3D 图像,而在  $-17^\circ \sim -5^\circ$  和  $5^\circ \sim 17^\circ$  区间重建出的图像存在串扰,如图 5 中黑色的虚线框所示。这说明常规的集成成像 3D 显示器主视区的 3D 观看视角约为  $7^\circ$ ,而大部分角度都位于串扰区内。综上所述,本文提出的会聚式集成成像的 3D 观看视角约是常规方法的 3.4 倍。该集成成像 3D 显示实验结果与理论分析结果基本相符,验证了理论分析的正确性。

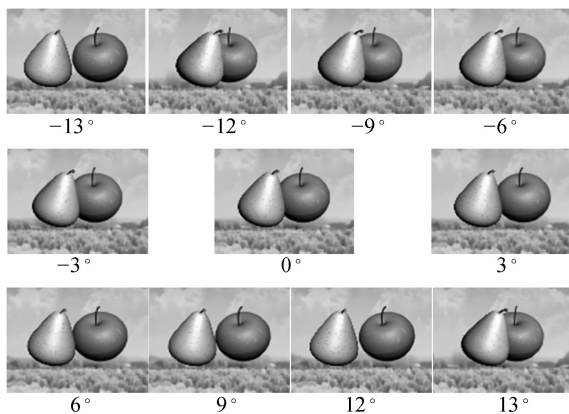


图 4 会聚式集成成像 3D 显示重建的图像

Fig. 4 3D images reconstructed by toed-in integral imaging 3D display

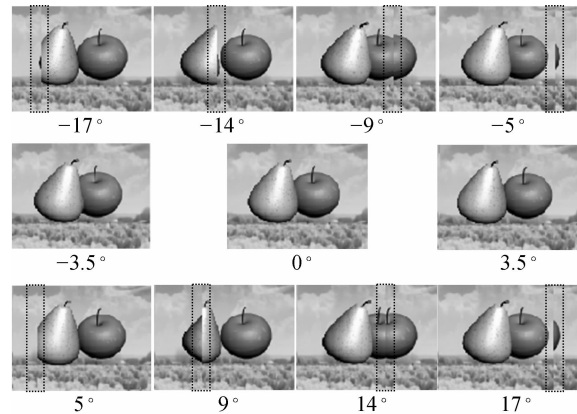


图 5 常规集成成像 3D 显示重建的图像

Fig. 5 3D images reconstructed by conventional integral imaging 3D display

### 3.2 光学实验

本文用高分辨率彩色打印机-EPSON STYLUS PHOTO 1390 分别打印出会聚式和常规微图像阵列,并将它们与节距为  $p=1.27\text{ mm}$  的微透镜阵列精密耦合,组装成会聚式和常规集成成像 3D 图画。然后用相机在最佳观看距离  $L=500\text{ mm}$  处,从不同角度拍摄会聚式和常规集成成像 3D 图画重建的 3D 图像,分别获得如图 6(a)和图 6(b)所示的结果。

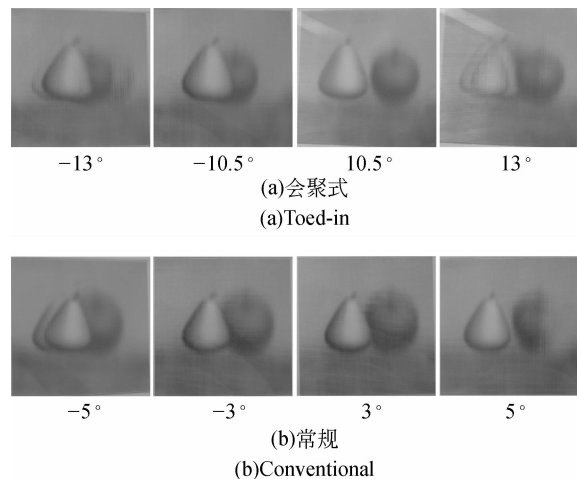


图 6 光学 3D 显示重建的图像

Fig. 6 3D images reconstructed by optical integral imaging 3D displays

由于微透镜阵列制作工艺的精度不够以及装配误差,导致实际光学实验获得的 3D 观看视角有所降低,会聚式方法获得的 3D 观看视角约为

21°;而传统方法的3D观看视角约为6°,会聚式集成成像方法仍有效地增大了3D观看视角。

## 4 结 论

本文提出了一种增大3D观看视角的会聚式集成成像法,该成像法包括会聚式集成成像3D拍摄和会聚式集成成像3D显示两个过程。会聚式3D拍摄时图像元节距大于透镜元节距,根据设定的集成成像3D显示器参数以及最佳观看距

离,推导出图像元节距与透镜元节距的数学关系,并根据各透镜元在微透镜阵列中的位置关系设置其拍摄视角。会聚式集成成像3D显示时的参数与3D拍摄时的参数完全相同,每个透镜元的观看视角都向中心透镜元的观看视角会聚,在设定的最佳观看距离处,集成成像3D显示器的3D观看视角扩大到中心透镜元的观看视角,且减小了串扰区。实验结果表明,在设定的最佳观看距离处,会聚式集成成像3D显示的3D观看视角是常规方法的近3.4倍,且消除了串扰。

### 参考文献:

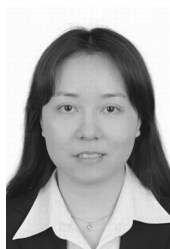
- [1] LIPPMANN G. La photographie integrale [J]. *Comptes-Rendus Acad. Sci.*, 1908, 146: 446-451.
- [2] DENG H, WANG Q H, LI D H, *et al.*. Realization of undistorted and orthoscopic integral imaging without black zone in real and virtual fields [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(5): 255-258.
- [3] LUO C G, WANG Q H, DENG H, *et al.*. Depth calculation method of integral imaging based on Gaussian beam distribution model [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(2): 112-116.
- [4] MOON I, MUNIRAJ I, JAVIDI B. 3D visualization at low light levels using multispectral photon counting integral imaging [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(1): 51-55.
- [5] XIAO X, JAVIDI B, MANUEL M C, *et al.*. Advances in three-dimensional integral imaging; sensing, display, and applications [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 546-560.
- [6] 杨勇,徐于萍,赵星,等.基于同名点间距变换的三维显示参数匹配[J].*光学精密工程*,2012,20(5):1084-1089.  
YANG Y, XU Y P, ZHAO X, *et al.*. Parameter matching of three dimensional display based on space of corresponding image point transformation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1084-1089. (in Chinese)
- [7] 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.  
JIAO X X, ZHAO X, YANG Y, *et al.*. Pick-up system for three-dimensional integral imaging with camera array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1653-1660. (in Chinese)
- [8] 赵星,王芳,杨勇,等.集成成像三维显示系统显示性能的研究进展[J].*中国光学*,2012,5(3):209-221.  
ZHAO X, WANG F, YANG Y, *et al.*. Research progress of display performance of integral imaging three-dimensional display system [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 209-221. (in Chinese)
- [9] KIM Y, PARK J H, CHOL H. Viewing-angle-enhanced integral imaging system using a curved lens array [J]. *Optics Express*, 2004, 12(3): 421-329.
- [10] HYUN J, HWANG D C, SHIN D H, *et al.*. Curved projection integral imaging using an additional large-aperture convex lens for viewing angle improvement [J]. *Electronics and Telecommunications Research Institute Journal*, 2009, 31(2): 105-110.
- [11] BAASANTSEREN G, PARK J H, KIM N. Viewing angle analysis for wide-viewing angle multi-layer integral imaging display [C]. *CLEO/Pacific Rim Conference, Shanghai, China*, 2009: 1-2.
- [12] 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.
- [13] DENG H, WANG Q H, LI L, *et al.*. An integral-imaging three-dimensional display with wide viewing angle [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2011, 19(10): 679-684.

## 作者简介:



邓 欢(1985—),女,四川内江人,博士,讲师,2007年,2012年于四川大学分别获得学士、博士学位,主要从事3D显示方面的研究。E-mail: huandeng@scu.edu.cn

## 通讯作者:



王琼华(1969—),女,四川通江人,博士,教授,博士生导师,1992年,1995年和2001年于电子科技大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事信息显示方面的研究。E-mail: qhwang@scu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)