

记录分辨率对 II 三维重建分辨率的影响

王红霞 伍春洪 杨扬 王倩倩

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

摘要 三维全景图像技术(Integral Imaging,简称 II)是一种能够记录和显示全真三维场景的图像技术。分辨率低一直是限制该技术发展的最重要因素之一,而其中记录分辨率对三维重建分辨率的影响尤其突出,但目前这方面的研究较少且与实际不符。在深度优先的 II 系统中分析研究记录分辨率对 II 三维重建分辨率的影响,推导出记录分辨率与深度的关系,并以实验验证所得结果。对 II 成像系统优化参数设计、物体空间分辨率分析及未来三维电视的数据处理具有重要意义。

关键词 三维全景图像技术,记录分辨率,三维重建分辨率,优化参数

中图法分类号 TP391.41 文献标识码 A

Effects of Record Resolution on II Three-dimensional Reconstruction Resolution

WANG Hong-xia WU Chun-hong YANG Yang WANG Qian-qian

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract Integral Imaging (II) is a technique capable of displaying three-dimensional images with continuous parallax in full natural color. Low resolution is always one of the most important factors which constrained the development of II technology. The most prominent factor that affects the II 3D reconstruction resolution is record resolution. But now the relative research is lack and inconsistency with the reality. We presented the effects of record resolution on the 3D reconstruction resolution in depth priority II system. The relationship between record resolution and depth information was derived. And experiments were conducted to confirm our conclusions. The results will play an important role in optimum parameter design, spatial resolution analysis and data processing of the next generation II-based 3DTV.

Keywords Integral imaging, Record resolution, 3D reconstruction resolution, Optimum parameters

1 引言

三维全景图像 Integral Imaging (简称 II)是一种通过微透镜阵列来记录和显示全真三维场景的三维图像技术^[1,2],最早于 1908 年由 Lippman 提出。该技术通过重建原来的物空间场景的光学模型来再现三维,记录和显示过程简单,无须相干光源,观看者不需佩戴特殊的眼镜即可以自由地看到特定深度的相应空间位置。这些特点使得 II 技术在三维电视和可视化方面有着广泛的应用前景,吸引着国际上三维技术领域的众多关注^[2]。

尽管 II 有多种优点,但分辨率低一直是限制 II 技术发展的最重要原因之一。II 三维图像的分辨率受多种因素的影响,如微透镜尺寸、孔径间距、记录和显示设备的分辨率等^[3]。在微透镜尺寸和孔径间距对分辨率影响的研究方面,人们已经进行了大量的工作^[4-6],而关于记录分辨率对重建分辨率影响的研究则较少。在 II 成像系统中,当记录分辨率过低时,显示设备的分辨率通常得不到充分利用,从而影响再现图像的分辨率^[7],因此研究记录分辨率对 II 三维重建分辨率的影

响是非常必要的。2004 年, Jin 首次就 II 元素图像中像素个数对图像空间分辨率的影响进行了理论分析^[8]。他指出,当每个元素图像包含的像素个数太少(即记录分辨率太低)时光线发散而非平行传播,从而严重影响了重建图像的分辨率;他还得出如下结论,在采用目前典型的微透镜参数条件下,单方向不影响 II 图像分辨率的元素图像的最小像素个数为 278。他的分析结果与实际情况并不完全符合。1995 年, Brewin 曾通过实验表明,当记录分辨率下降到每个小微透镜下只有 3~4 个点时,仍可呈现较好的 3D 视觉效果^[9]。因此,需要进一步对记录分辨率对 II 三维重建分辨率的影响进行更深入且接近实际的研究。本文首先在深度优先的 II 系统中分析研究记录分辨率对 II 三维重建分辨率的影响,然后推导记录分辨率与深度的关系,最后以实验验证所得结果并给出结论。

2 Integral Imaging

目前各种 II 技术都源于 Lippmann 1908 年的工作^[1],图 1 是深度优先 II 系统的记录和再现过程原理图。一张由微透镜阵列组成的薄片用来记录三维物体空间场景,记录平面被

到稿日期:2008-06-04 本文受国家自然科学基金(No. 60673160),863 项目(2007AA01Z234)资助。

王红霞(1979-),女,博士生,主要研究方向为三维全景图像技术、图像处理,E-mail:whx4617@163.com;伍春洪(1972-),女,副教授,主要研究方向为三维全景图像技术、计算机视觉、图像处理与分析等;杨扬(1955-),教授,博士生导师,主要研究方向为多媒体通信、网格技术等;王倩倩(1984-),硕士生,主要研究方向为三维全景图像技术、图像处理。

放置在微透镜阵列的焦平面上,每个微透镜都从不同的方向记录一部分物体空间(图 1a)。有多少个微透镜就有多少个相应的“元素图像”,空间任意一点的视差信息都被这许许多多的“元素图像”分散记录于整个记录胶片上。将记录胶片放在一张具有同样参数的微透镜阵列薄片后,相应的显示微透镜阵列把许许多多“元素图像”透射出来的光线聚集还原,即可再现原来的三维光学场景(图 1b)。

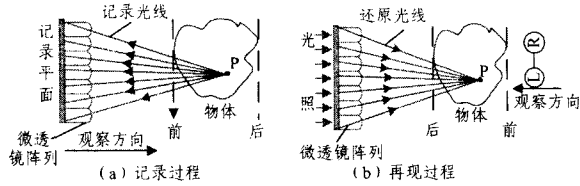


图 1 II 成像系统原理图

3 记录分辨率对重建分辨率的影响

3.1 重建模型

本文以计算机生成三维全景图像为出发点,采用简单小孔成像模型进行分析。在简单小孔模型中,小孔被安置在透镜凸面的顶端,光线经小孔入射后,方向不会发生变化,如图 2(a)所示;另外,使用这一模型可以去除球面像差、透镜失真等物理限制或缺陷,能极大地简化运算。在该模型的重建过程中,由某记录点还原的光线虽然从微透镜表面的任意位置出射,但方向都与经过小孔的那条光线平行,如图 2(b)所示。图中 φ 表示微透镜的宽度, f 表示微透镜的焦距, d 表示空间中任一点到微透镜小孔的距离。

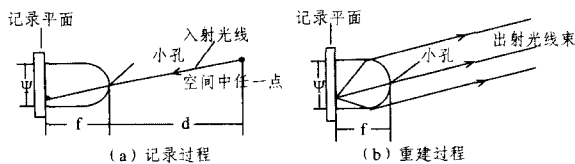


图 2 简单小孔模型

先建立记录分辨率为无穷大时(即不考虑记录分辨率限制)空间任意点的重建模型。假设空间中任一点 $P(x_0, D)$, 以参与记录的一个小微透镜为例来讨论在 II 系统中该点的重建情况。小微透镜的宽度为 φ , 焦距为 f , 第 m 个记录小微透镜中心小孔坐标为 $m_k(x_k, 0)$, 记录点坐标为 $n_k(x_k', -f)$ 。每个记录点在重现过程中都会从微透镜表面的各个位置射出,且这些出射光线都平行于穿过中心小孔的那条光线,如图 3 所示。那么重建过程中重建光线的斜率可由对应小微透镜的中心小孔及记录点位置得出,如式(1):

$$k = \frac{f}{(x_k - x_k')} \quad (1)$$

记录点 n_k 在重建过程中,重建光线可取的最大 x 范围为

$$x_{k左} = x_k - \varphi/2 \quad (2)$$

$$x_{k右} = x_k + \varphi/2 \quad (3)$$

由基本数学知识及式(1)、(2)、(3)可得经此微透镜重建光线束最左边的那条光线方程为

$$z_{k左} = k(x - x_{k左}) = \frac{f}{x_k - x_k'} [x - (x_k - \varphi/2)] \quad (4)$$

同理,光线束最右边的那条光线方程为

$$z_{k右} = k(x - x_{k右}) = \frac{f}{x_k - x_k'} [x - (x_k + \varphi/2)] \quad (5)$$

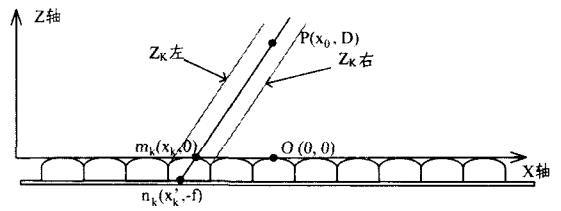


图 3 重建光线示意图

3.2 有限记录分辨率与重建分辨率的关系

记录分辨率即每一小微透镜下可记录的点的个数。在当前的 II 研究中,人们都以记录分辨率无穷大为前提^[7],而在实际情况中,记录分辨率是有限的。图 4 给出了记录分辨率为 n 的示意图,各点编号依次为 $1, 2, \dots, n$ 。

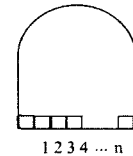


图 4 记录分辨率示意图

在记录分辨率有限的 II 三维重建过程中,若两记录点落在同一编号区域,则在重建过程中将这两点当作一个点来处理,落入同一区域的记录点皆用该区域的中点来表示。本文先根据记录分辨率的大小确定各记录点所属的位置,进而根据上文重建模型式(4)和式(5)确定重建光线的方向。

若记录分辨率过小,则相邻两记录点会被当作一点进行重建,使两微透镜的出射光线束相互平行而不是相交,造成重建效果不理想,如图 5 所示。

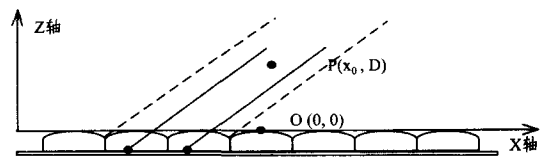


图 5 记录分辨率太小造成重建光线束平行

下面从理论上分析出现图 5 所示情况的条件。在三维全景图像记录过程中,相邻两记录点之间的视差可表示为

$$\Delta = \varphi / (2 * m) \quad (6)$$

其中, Δ 表示视差值, φ 为小微透镜宽度, $2 * m$ 为参与记录的微透镜个数,其中 $m = d / (2 * f)$, d 为点的深度, f 为微透镜焦距。

现假设记录分辨率为 res , 那么记录精度 dlt 可表示为

$$dlt = \varphi / res \quad (7)$$

在 II 系统中,只有当视差值大于记录精度时所有记录点才是可分辨的,即不会出现如图 4 所示的情况。由式(6)、式(7)可得:两记录点可分辨的临界条件为

$$res \geq d / f \quad (8)$$

由式(8)可知,使所有记录点均可分辨所要求的最小记录分辨率与深度成正比,即深度越大所要求的记录分辨率越高。

4 实验

本实验用计算机生成方法模拟三维重建,根据每一像素点被重建光线束覆盖的次数给出实验点的重建范围。重建图像中用颜色的深浅来表示每一像素点被重建光线束覆盖的次数(设 max 为最大覆盖次数)。实验流程图如图 6 所示。颜

色最深的菱形区域为覆盖次数为 \max 的区域,如图 7(a)所示。重建的等效范围由被覆盖次数大于 $\max/2$ 的点组成,图中用黑色区域表示,如图 7(b)所示。

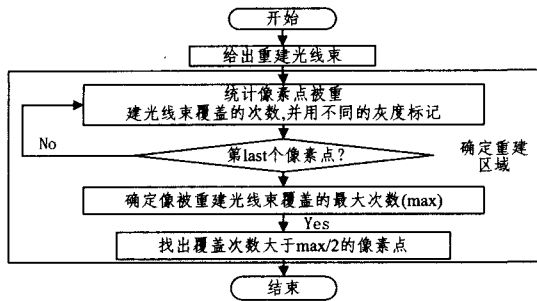


图 6 实验流程图

实验中微透镜宽度 φ 为 0.6mm,焦距 f 为 2mm,微透镜阵列的中心为坐标原点,重建的等效范围用黑色区域表示。图 7(b)中黑色区域即为空间一深度为 24mm 的点在分辨率无穷大时的重建范围。

继续以深度 $d=24\text{mm}$ 为例,分别模拟了记录分辨率 res 为 8, 10, 12, 50 时的三维重建情况(如图 7(c)~图 7(f)所示)。由上面的式(8)可知,当深度 d 为 24mm,最小记录分辨率为 12 时,所有记录点是可分辨的。而由实验结果也可以看出,当 res 为 12 时,重建结果达到我们预期的效果(如图 7(e)所示),与分辨率无穷大时重建的理想结果非常接近,当 res 继续增大时,重建结果没有明显的变化,如图 7(e)、图 7(f)所示。

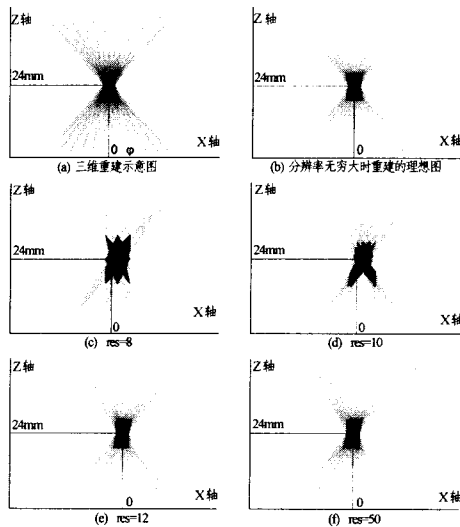


图 7 记录分辨率为 8, 10, 12, 50 时的重建图

为了验证记录分辨率与深度的关系,接下来改变点的深度进行多组重建实验。从实验中得到不同深度点恰好可被分辨的记录分辨率,并展示两者关系,如图 8 黑色标志点所示。

图中黑色线条表示理论分析得出的临界记录分辨率 res 值与深度 d 的关系。从图 8 中可以看出实验结果与理论分析结果吻合,从而得到所有临界 res 值与深度 d 成正比例关系,与前面的分析结果一致(见式(8))。

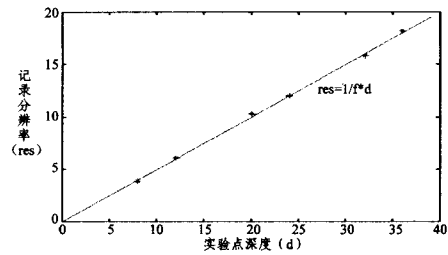


图 8 记录分辨率与深度关系图

结束语 本文在深度优先的 II 系统中分析研究了记录分辨率对 II 三维重建分辨率的影响,计算出在传统 II 成像系统中,当深度为 24mm 时,不影响三维重建效果的记录分辨率需达到的最小值为 12,推导出记录分辨率与深度成正比例关系,并在最后以实验验证了所得结果的正确性。本文对 II 成像系统优化参数设计、物体空间分辨率分析及未来三维电视的数据处理具有重要意义。

参考文献

- [1] Okoshi T. Three dimensional imaging Techniques [M]. London: Academic Press, 1976
- [2] Davis N, et al. Design and analysis of an image transfer system using microlens arrays [J]. Optical Engineering, 1994, 33 (11): 3624-3633
- [3] Kim Y, Kim J, Kang J, et al. Point light source integral imaging with improved resolution and viewing angle by the use of electrically movable pinhole array [J]. Optics Express, 2007, 15 (26): 18253-18267
- [4] Burckhardt C B. Optimum parameters and resolution limitation of integral photography [J]. J. Opt. Soc. Am., 1968, 58: 71-76
- [5] Okoshi T. Optimum design and depth resolution of lens - sheet and projection-type three-dimensional displays [J]. Applied Optics, 1971, 10: 2284-2291
- [6] Hoshino H, Okano F, Isono H, et al. Analysis of resolution limitation of integral photography [J]. J. Opt. Soc. Am., 1998, 15: 2059-2065
- [7] Park J H, Kim Y, Lee B. Elemental image generation based on integral imaging with enhanced resolution [C] // Proceedings of SPIE. 2005, 5642: 186-194
- [8] Jin F, Jang J S. Effects of device resolution on three-dimensional integral imaging [J]. Optics Letters, 2004, 29 (12): 1345-1347
- [9] Brewin M, Forman M, et al. Electronic capture and display of full parallax 3D images [C] // Proceedings of the SPIE. 1995, 2409: 118-124

(上接第 250 页)

- [4] Xin Y Q, Pawlak S. A multibit geometrically robust image watermark based on Zernike moments [A] // 17th International Conference on Pattern Recognition [C]. 23-26 Aug. 2004, 14: 861-864
- [5] Xin Y, Liao S, Pawlak M. Geometrically robust image watermarking on a circular domain [J]. Pattern Recognition, 2007, 40 (1): 3740-3752
- [6] 李雷达, 郭宝龙, 刘雅宁. 基于伪 Zernike 矩的抗几何攻击图像

水印 [J]. 光电子·激光, 2007, 18(2): 221-235

- [7] Kamila N K, Mahapatra S, Nanda S. Invariance image analysis using modified Zernike moments [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(1): 747-753
- [8] Xin Y, Pawlak M, Liao S. Accurate Computation of Zernike Moments in Polar Coordinates [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2): 581-587
- [9] 吴乐南. 数据压缩 [M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [10] Hsu C T, Wu J L. Image Hidden digital watermarks in images [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1999, 8(1): 58-68