

基于光线追迹的集成成像技术重建分辨率研究

张娟 周立秋 张勃 张赞 郑义 赵星

南开大学现代光学研究所光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071

摘要 集成成像技术重建分辨率的表征方法对集成成像系统性能的优化及评价具有重要的意义。根据几何光学原理,考虑数字记录过程中的像素离散化影响,结合元素图像阵列中的同名像素相关性,对同名像素在像空间投影叠加实现三维信息重建的过程进行了深入分析,定义了集成成像技术像空间的横向和纵向分辨率,并研究了其沿轴分布特性。理论分析和实验结果均表明,集成成像技术的横向和纵向分辨率沿轴向呈现不均匀的分布特性。

关键词 成像系统; 集成成像; 三维重建; 分辨率; 分布特性

中图分类号 O49 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1108004

Study on Reconstruction Resolution of Integral Imaging Technique Based on Ray-Tracing Method

Zhang Juan Zhou Liqiu Zhang Bo Zhang Zan Zheng Yi Zhao Xing

Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract Characterization method of reconstruction resolution of integral imaging technique is significant to the optimization and evaluation of integral imaging system. According to the principle of geometrical optics, considering the pixel discretization effect in the process of digital records, the projection and overlapping of corresponding pixels in image space of three-dimensional reconstruction processing are deeply analyzed, combining the correlations of corresponding pixels in elemental images array. The lateral and depth resolution of integral imaging in image space are defined, and their axial distribution character is studied. The theoretical analysis and experimental results demonstrate that the axial distribution character of lateral and depth resolution of integral imaging is inhomogeneous.

Key words imaging systems; integral imaging; three dimensional reconstruction; resolution; distribution property
OCIS codes 110.6880; 110.3000; 100.6890

1 引言

集成成像是一种近年来快速发展的立体显示技术,最早由诺贝尔奖获得者Lippmann于1908年提出,具有系统结构简单,无需相干光源,视差完整,视角连续等特点,已得到广泛研究^[1-7]。应用数字化的计算重建方法,可在计算机中重建出三维场景的数字模型,同时可对其数字信息进行相关处理与应用^[8-9]。为了获得高质量的重建结果,许多研究致力于集成成像技术的分辨特性,然而,大部分的研究报告着重于分辨性能的提高^[10-13],并没有对分辨率的特性进行准确的分析,而集成成像技术的横向和纵向分辨率的表征结果对集成成像系统的优化及评价具有重要的指导作用,因此展开这部分工作是非常有必要的。最近,Navarro等^[14]应用波动光学理论对集成成像技术的横向分辨率进行相关研究,提出了横向分辨率的不均匀分布特性。

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(11474169)、天津市自然科学基金(15JCYBJC16900)、天津市高等学校科技发展基金(20140906)

作者简介: 张娟(1991—),女,硕士研究生,主要从事三维成像技术及光学信息处理方面的研究。

E-mail: 13163286782@163.com

导师简介: 赵星(1980—),男,博士,副教授,主要从事三维成像技术、应用光学及光学信息处理等方面的研究。

E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn(通信联系人)

Kavehvash 等^[15]用几何光学的方法,提出深度分辨率平面和横向分辨率平面的概念,并得到三维横向和纵向分辨率在特定平面上的分布特性。以上研究成果,均未对集成成像技术像空间的横向和纵向分辨率的量化表征和分布特性展开全面的研究。为此,本文利用几何光学的方法,结合同名像点相关性,对集成成像技术的横向和纵向分辨率沿轴分布特性进行量化表征,给出分辨率在一定范围内的分布特性曲线,得到了实验验证。

2 重建分辨率的表征

基于集成成像原理的重建分辨率,与物点在记录阶段得到的同名像点间距密切相关。根据集成成像原理,在记录阶段,三维物体任意位置处的一点经透镜阵列成像都会在元素图像上产生对应的同名像点。目前常用的光电成像设备对真实场景成像及生成数字图像的过程中,其数字采样率受到记录介质最小像元尺寸的限制,使得元素图像发生了像素离散化,即图像的最小可分辨单元由像点大小变为像素大小。这些经像素离散化后的二维元素图像阵列在进行三维信息的数字重建时,会产生三维重建信息的空间离散化。为了表述方便,将这种像素化的同名像点称为同名像素,同一像素内包含的信息在重建过程中是不可分辨的。元素图像阵列中的一组同名像素经透镜阵列成像时,其所成的像在像空间叠加于某一区域内,该区域的信噪比要远高于邻近区域,即物空间的一个三维点被透镜阵列记录时,在数字记录介质表面像素离散化,最终重建出一个与之对应的空间区域,因此像空间可以认为是被这样的一些重建区域所分割。

如图1所示, M'_1 到 M'_N 为对应于同一物点 M_o 的同名像素, g 为元素图像阵列到透镜阵列的距离, σ 为元素图像阵列上的像素大小, p 为子透镜直径。当元素图像阵列上属于同一物点的所有同名像素经透镜阵列在像空间叠加时,若各同名像素的中心光线可交于一点,即图1中的 M 点,此时所有同名像素的出射光束能量均以此交点为中心进行叠加,导致该空间区域的信噪比高于周围区域。由集成成像重建原理可知,元素图像阵列中不同位置处的同名像素所对应的能量叠加区域大小不同。离光轴最远的元素图像中的同名像素在轴上投影叠加时的能量叠加区域最小,信噪比最高,因此该区域的尺寸决定了像空间的重建分辨率。根据以上分析,定义同名像素在像空间某重建平面上横向投影尺寸的倒数为该重建位置处的横向分辨率,同时定义离光轴最远的同名像素在该重建位置处纵向投影尺寸的倒数为该处的纵向分辨率。根据上述定义,利用几何光学原理,即可推算出各重建位置处的横向和纵向分辨率,分别表示为

$$d = p + n\sigma, n = 1, 2, \dots, \frac{p}{2\sigma}, \quad (1)$$

$$Z = \frac{pg}{d-p}, \quad (2)$$

$$L = \frac{d-p}{p\sigma}, \quad (3)$$

$$D = \frac{(N-1)^2(d-p)^2 - \sigma^2}{2(N-1)pg\sigma}, \quad (4)$$

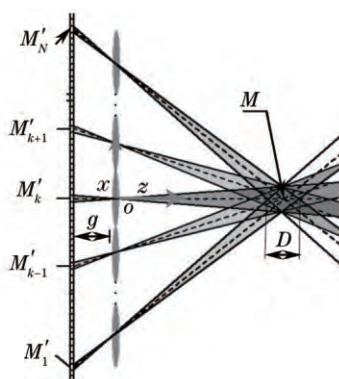


图1 三维重建过程中像空间内的同名像素叠加

Fig.1 Overlapping of corresponding pixels in image space of three-dimensional reconstruction processing

式中 N 为透镜阵列维数, d 是同名像点间距, Z 是重建位置坐标, L 是重建位置 Z 处的横向分辨率, D 是重建位置 Z 处的纵向分辨率。由于元素图像受到像素离散化的影响, 同名像点间距 d 只能以像素尺寸 σ 的 n 倍变化 (n 为整数)。

在此应注意到, 由于像素离散化的影响, 同名像素在每一个元素图像中的相对位置是不同的, 故其在像空间的叠加情况也有所差异, 之前讨论的是所有同名像素的中心光线在像空间叠加相交于一点的情况, 由几何关系可知, 当物点的记录位置改变时, 离光轴最远的同名像素将首先移动到相邻像素处, 而离光轴较近的同名像素位置保持不变, 如图 2 所示, 图中的 M'_1 和 M'_N 同名像素分别移动到图中的 M'_1 和 M'_N 的位置处, 其余同名像素位置未发生移动。由此该变化导致重建时自同名像素 M'_1 和 M'_N 出射的中心光线在像空间叠加时与其他光线不能再交于一点, 即重建阶段同名像素 M'_1 和 M'_N 与其他同名像素产生了错位叠加, 形成了如图 2 所示的 M' 点位置处的能量叠加区域。该空间区域的信噪比仍高于周围区域, 但错位叠加导致投影叠加区域变大, 相较于不存在错位叠加的情况会引起纵向分辨率的下降。

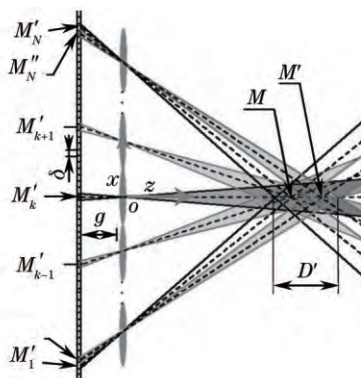


图 2 三维重建过程中像空间内的同名像素错位叠加

Fig.2 Dislocation overlapping of corresponding pixels in image space of three-dimensional reconstruction processing

当物点的记录位置继续改变时, 同名像素间距继续增加, 这种重建过程中能量错位叠加的现象一直持续到距离光轴最近的同名像素移动到相邻像素处为止。对于这种同名像素错位叠加的区域, 近似将半个像素在像空间某重建平面上横向投影尺寸的倒数定义为该重建位置处的横向分辨率, 将持续出现叠加错位现象的区域轴向尺寸的倒数定义为该重建位置处的纵向分辨率。根据上述分析, 得出此种情况下的分辨率公式为

$$Z' = \frac{2((N-1)(d-p-\sigma) + \sigma)((N-1)(d-p) - \sigma)}{(N-1)^2 pg(2d-2p-\sigma)}, \quad (5)$$

$$L' = \frac{4[(N-1)(d-p-\sigma) + \sigma][(N-1)(d-p) - \sigma]}{(N-1)^2 pg(2d-2p-\sigma)}, \quad (6)$$

$$D' = \frac{[(N-1)(d-p-\sigma) + \sigma][(N-1)(d-p) - \sigma]}{(N-1)pg(N-3)\sigma}, \quad (7)$$

式中 Z' 为图 2 中点 M' 的轴向位置坐标, L' 为该位置处的横向分辨率, D' 为该位置处的纵向分辨率, 变量 N, d, p, σ 的定义与(1)~(3)式保持一致。

为了对分辨率特性进行全面的分析, 进行了如下的理论分析计算。取维数为 7×7 的元素图像阵列, 其中单个元素图像的像素数为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 像素尺寸 $\sigma = 20 \mu\text{m}$, 元素图像阵列到透镜阵列的距离 $g = 40 \text{ mm}$ 。利用上述参数代入两组横向和纵向分辨率计算公式中, 即可得到此集成成像系统三维分辨率在像空间沿光轴方向的分布情况, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 集成成像的三维空间分辨率随重建深度的增加逐渐减小, 但并不是随着深度的增加成简单的线性变化, 而是成阶梯形不均匀性分布。这种阶梯形的变化正是由于记录时元素图像阵列的像素离散化所引起的, 即像素离散化引发的同名像素叠加重建过程中交替出现的错位叠加和非错位叠加现象。

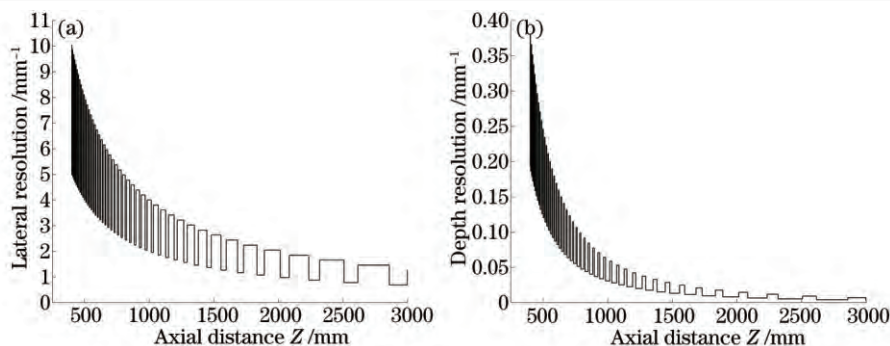


图3 集成成像重建像空间分辨率轴向分布特性。(a) 横向分辨率;(b) 纵向分辨率

Fig.3 Axial distribution character of reconstruction resolution in image space of integral imaging.

(a) Lateral resolution; (b) depth resolution

3 实验验证

为进一步验证上述集成成像系统参数下三维重建分辨率的阶梯状分布趋势,进行了三维信息的光学记录与数字重建实验验证。实验中将相机(Canon 550D)放置在二维平移台 GZH190DY(50-500)J 上,通过横向和纵向扫描的方式模拟二维透镜阵列的记录成像过程。其中,电动平移台由运动控制器编程控制,最小移动步长为 0.01 mm。

实验具体步骤为:根据所要验证的理论曲线段的分辨率数值及间隔,在相机的成像景深范围内确定相机记录距离的范围为 595~685 mm,设计分辨率板线对间隔,依据此记录范围内的理论分辨率数值,设置其线宽从 0.3 mm 变化至 0.405 mm,间隔步长为 0.015 mm。实验中,利用一维水平平移台带动分辨率板移动,间隔步长为 5 mm;控制电动平移台带动相机移动,将相机焦距设为 40 mm,移动间隔为 3.15 mm,最终得到 19 组不同记录距离下的 7×7 的元素图像阵列,并分别进行数字重建,其中用于重建的每个元素图像为 9.76 mm×9.76 mm 的正方形区域,该区域内的像素数为 512 pixel×512 pixel;根据清晰重建面处分辨率板的灰度提取结果,确定其最小可分辨线宽,从而得到分辨率分布特性曲线。实验中设计使用的分辨率板如图 4 所示。

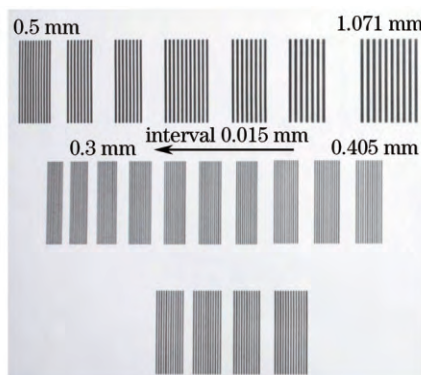


图4 实验中所使用的分辨率板

Fig.4 Resolution panel used in the experiment

根据集成成像重建原理,当分辨率板的记录位置确定后,同名像点的位置关系即可确定,此时系统只有一个清晰重建平面。应用几何光学原理,用记录和重建端元素图像的转换关系,将记录端元素图像阵列中的同名像点间距转换为重建端元素图像阵列中的同名像点间距,从而根据重建端系统参数确定像空间内的清晰重建平面位置,建立分辨率板的记录距离与清晰重建平面位置之间的对应关系。随后,利用基于深度的集成成像数字重建方法,对不同记录位置处的元素图像阵列在清晰重建平面位置处进行深度平面重建。图 5 为重建平面位置处于 $Z=1874$ mm 处的数字重建结果,重建时取元素图像阵列到重建透镜阵列的距离 $g=40$ mm。对得到的分辨率板重建像上某横截位置处的灰度值进行提取,并根据瑞利能量判据进行计算,即可确定重建平面上的最小可分辨线宽,图 6 为 $Z=1874$ mm 和 $Z=1967$ mm 处分辨率板重建像的灰度提取结果。

对所有记录位置处分辨率板的重建像进行相同的处理,确定其可分辨的最小线对间距,即可得到如图7所示的集成成像系统像空间重建分辨率的沿轴分布情况。

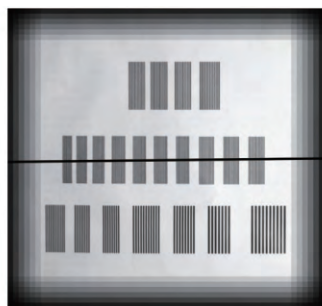


图5 重建深度为 1874 mm 位置处分辨率板的重建结果

Fig.5 Reconstruction result of the resolution target at the location of 1874mm reconstruction depth

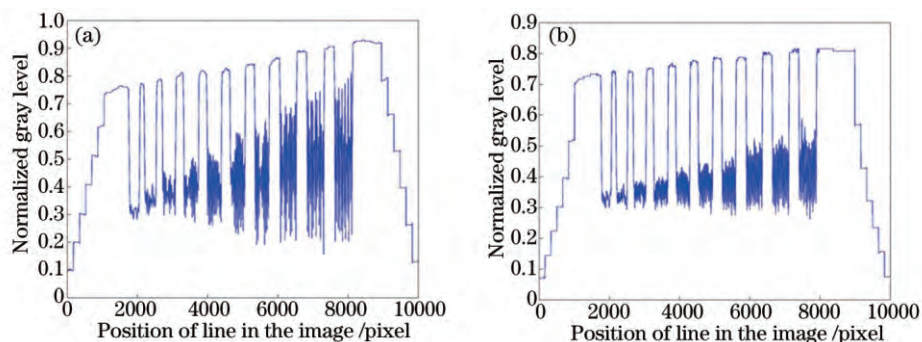


图6 重建图像灰度提取结果。(a) 重建深度 $Z=1874$ mm;(b)重建深度 $Z=1967$ mm

Fig.6 Gray-scale extraction result of the reconstruction image. (a) Reconstruction depth $Z=1874$ mm;
(b) reconstruction depth $Z=1967$ mm.

从图7可以看出,实验结果与理论计算结果在数值上存在误差,且图中实验结果曲线相对理论计算结果曲线沿横坐标轴方向存在微小的位移量,产生这些误差的原因包括:实验中分辨率板线宽的不连续变化,光学记录系统中包括镜头像差、位移台运动误差和相机成像器件噪声在内的系统误差,以及集成成像系统横向与纵向分辨率定义和表征方法中使用的几何近似等。但实验所得集成成像系统横向与纵向分辨率沿轴分布特性与理论计算结果的变化趋势是基本一致的,验证了所提出的集成成像分辨率的定量表征方法以及分析得到的横向和纵向分辨率的沿轴分布特性的正确性。

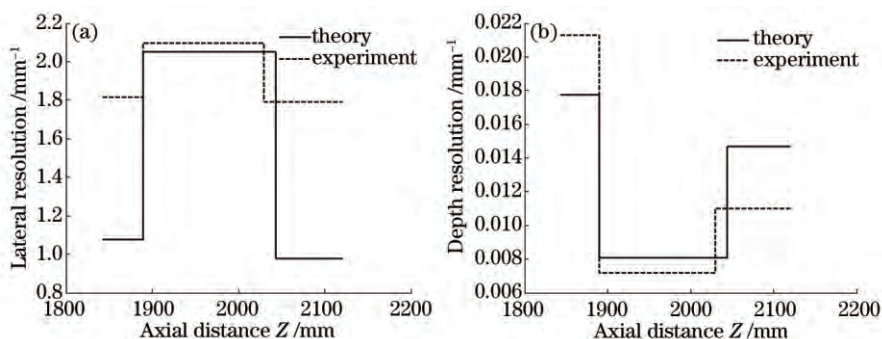


图7 集成成像系统横向和纵向重建分辨率的理论计算结果与实验结果对比。(a) 横向分辨率;(b) 纵向分辨率
Fig.7 Contrast of theoretical calculation and experimental results of the lateral and depth resolution in integral imaging.

(a) Lateral resolution; (b) depth resolution

4 结 论

综上所述,对元素图像阵列存在像素离散化情况下的三维重建分辨率进行研究,利用元素图像阵列中同名像点间距与再现深度的关系,分析了元素图像像素离散化对集成成像重建像的影响,定义了集成成像技术

的横向和纵向分辨率,并推导了计算公式,通过此种定量化表征的方法研究了横向和纵向分辨率的轴向分布特性。结果表明,系统的横向和纵向分辨率随重建深度的增加而减小,且沿轴向呈阶梯状不均匀分布的特点。这一理论分析结果,在相应的光学记录和数字重建实验研究中得到了验证。对集成成像系统的分辨率性能评价与系统优化,以及集成成像三维重建技术的应用有重要的理论指导作用。

参 考 文 献

- 1 S Sawada, H Kakeya. Integral volumetric imaging using decentered elemental lenses[J]. *Opt Express*, 2012, 20(23): 25902–25913.
- 2 Wang Yu, Piao Yan. Computational reconstruction for integral imaging with sampled elemental images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 34(5): 0511003.
王 宇, 朴 燕. 基于元素图像阵列采样的集成成像重构方法[J]. *光学学报*, 2012, 34(5): 0511003.
- 3 D Shin, C Tan, B 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.
- 4 Zhao Xing, Wang Fang, Yang Yong, *et al.*. Research progress of performance of integral imaging three-dimensional system[J]. *Chinese Optics*, 2012, 2012, 5(3): 209.
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.
- 5 Jiao Xiaoxue, Zhao Xing, Yang Yong, *et al.*. Elemental images correction of camera array pick-up for three-dimensional integral imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0309001.
焦小雪, 赵 星, 杨 勇, 等. 基于三维集成成像相机阵列获取的元素图像校正[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0309001.
- 6 Liu Yao, Deng Huan, Luo Chenggao, *et al.*. An integral imaging three dimensional display method based on aperture stop array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0910004.
刘 尧, 邓 欢, 罗成高, 等. 基于光孔阵列的集成成像三维显示方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0910004.
- 7 Wang Xiaorui, Bu Qingfeng, Zhang Dongyang, *et al.*. Research on enhancement methods for depth of field of three-dimensional integral imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(8): 26–30.
王晓蕊, 卜庆风, 张冬阳, 等. 三维集成成像景深提高方法的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(8): 26–30.
- 8 J J Lee, B J Lee, H Yoo. Depth extraction of three-dimensional objects using block matching for slice images in synthetic aperture integral imaging[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(29): 5624–55629.
- 9 V Javier Traver, P Latorre-Carmona, E Salvador-Balaguer, *et al.*. Human gesture recognition using three-dimensional integral imaging [J]. *J Opt Soc Am A*, 31(10): 2312–2320.
- 10 J S Jang, B Javidi. Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of nonstationary micro-optics[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(5): 324–326.
- 11 S H Hong, B Javidi. Improved resolution 3D object reconstruction using computational integral imaging with time multiplexing[J]. *Opt Express*, 2004, 12(19): 4579–4588.
- 12 Y Chen, X Wang, J Zhang, *et al.*. Resolution improvement of integral imaging based on time multiplexing sub-pixel coding method on common display panel[J]. *Opt Express*, 2014, 22(15): 17897–17907.
- 13 M Cho, B Javidi. Optimization of 3D integral imaging system parameters[J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(6): 357–360.
- 14 H Navarro, E Sánchez-Ortiga, G Saavedra, *et al.*. Non-homogeneity of lateral resolution in integral imaging[J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(1): 27–43.
- 15 Z Kavehvasht, M Martinez-Corral, K Mehrany, *et al.*. Three-dimensional resolvability in an integral imaging system[J]. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29(4): 525–530.

栏目编辑: 苏 岑