

文章编号 1004-924X(2012)05-1084-06

基于同名点间距变换的三维显示参数匹配

杨 勇, 徐于萍, 赵 星, 步 敬, 袁小聪*

(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:传统集成成像系统以重构场景为记录场景的镜像,而当用相机阵列代替透镜阵列获取元素图像时,两种阵列参数的不匹配会破坏上述镜像关系。为了得到相机阵列获取的元素图像经透镜阵列重构后的物像关系,本文提出用同名点间距计算集成成像重构像距的方法。该方法通过获取端场景物距、相机焦距等参数,得到同名点间距,并等效至重构端透镜阵列系统来实现光学参数的匹配。理论计算表明,同名点间距不同,得到的重构像距也不同。对与透镜阵列参数匹配的同名点间距进行变换处理,即可精确再现不同重构像距的景物。最后,通过实验验证了本文所提方法的有效性。

关键词:三维显示;集成成像;相机阵列;透镜阵列;同名点间距;重构像距

中图分类号:O435;TB811.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122005.1084

Parameter matching of three dimensional display based on space of corresponding image point transformation

YANG Yong, XU Yu-ping, ZHAO Xing, BU Jing, YUAN Xiao-cong*

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

* Corresponding author, E-mail: xcyuan@nankai.edu.cn

Abstract: Three-dimensional scene is the mirror image of recording scene in a traditional integral imaging system. However, when a camera array is employed to capture elemental images, it can not be reconstructed correctly because of the mismatch between the parameters of lens array and the parameters of camera array. In order to rebuild a new relationship between the reconstructed image distance and the parameters of elemental images, a new method by using the Space of Corresponding Image Points (SCIP) to calculate the reconstructed image distance is proposed. In this method, the SCIP is a function of the object distance of scene, the focal length of camera and other parameters. It is equivalent to the lens array in the process of image reconstruction. By transforming the SCIP matched with the parameters of lens array, the scene with different reconstructed image distances can be reconstructed exactly. By experiments, this paper verifies that different SCIPs can result in different reconstructed image distances theoretically and experimentally.

Key words: three-dimensional display; integral imaging; camera array; lens array; Space of Corresponding Image Point(SCIP); reconstructed image distance

收稿日期:2011-12-14;修订日期:2012-02-15.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2010CB327702)

1 引 言

近年来三维成像与显示技术成为人们关注的热点领域^[1-3]。在现有的技术中,集成成像技术^[4-5]由于具有裸眼、全视差、连续视角等优势被认为是最有希望实用化的三维成像与显示技术。集成成像技术中,元素图像的获取可以采用透镜阵列获取和相机阵列获取 2 种方式,其中相机阵列获取方式^[6-7]由于具有获取的元素图像分辨率高、参数设计灵活、视差调整方便等特点,被广泛用于替代透镜阵列获取元素图像,但是采用相机阵列获取的元素图像由于其获取不同视角图像的光学参数很难与三维影像重构系统透镜阵列的光学参数匹配,致使相机阵列获取的元素图像必须经过必要的变换处理才能用于采用透镜阵列的显示系统^[8-11]。目前,常用的方法多为利用计算机数字处理方法从记录的二维图像中恢复出目标物体的三维形貌,再根据透镜阵列的光学参数重新生成元素图像,主要有:立体视觉匹配法^[12]、成像重构法^[13]和多视点投影法^[14]等。但这些方法均以恢复目标物体的三维形貌为前提,普遍存在计算复杂、运算量大、精度低、分辨率低等问题,特别是当恢复复杂物体时问题更加严重。通过大量研究发现,复杂景物可以分割为简单景物的组合,对简单景物的变换处理无需上述复杂算法。为此,本文提出一种通过采用不同视角元素图像同名点间距的变换方法,对三维场景进行拍摄,通过相机参数,以及场景的拍摄距离计算出相应的同名点间距,理论推导出相机阵列获取系统与透镜阵列重构系统的对应关系,并通过实验验证,证明了所提出方法的正确性以及可行性。

2 同名点间距变换原理

集成成像系统由三维景物获取系统和三维影像重构系统 2 部分组成,如图 1 所示,通常情况下,为了将通过三维景物获取系统获得的元素图像直接应用到三维影像重构系统中,需要使三维景物获取系统的透镜阵列的参数与三维影像重构系统的透镜阵列的参数一致,若不一致,则无法准确地重构出三维景物像距 l' ,同时也会使再现像存在串扰等问题。研究发现,重构的三维景物像

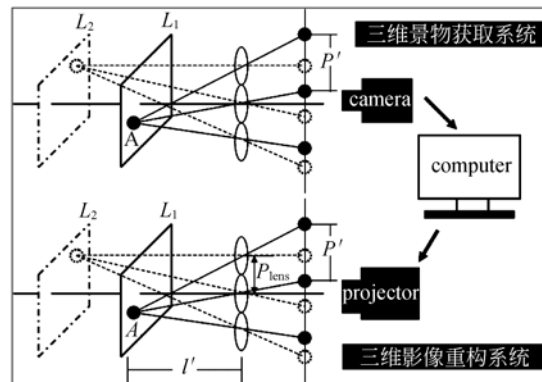


图 1 元素图像获取与重构

Fig. 1 Record and reconstruction of elemental images

距是由元素图像中同名点间距 p' 所决定的^[15]。同名点间距定义为:在元素图像获取过程中特定物距的景物经透镜阵列成像后,在 CCD 像面上不同位置所成像的距离。以图 1 所示为例,根据物象关系,平面 L_1 上的 A 点经透镜阵列成像在 CCD 的不同位置,各位置间的距离称为同名点间距。将获得的带有同名点信息的元素图像应用到三维影像重构系统中,则同名点间距与重构的三维景物像距的关系为^[15]:

$$l' = f_{\text{lens}} \frac{p'}{p' - p_{\text{lens}}}, \quad (1)$$

其中 l' 为重构的三维景物像距, p' 为同名点间距, p_{lens} 为透镜阵列间距, f_{lens} 为透镜焦距。根据式 1 可知,当透镜阵列的间距和焦距确定后,重构出的三维景物像距仅与同名点间距有关,而与获取系统参数无关。也就是说,当采用与三维影像重构系统透镜参数不一致条件下获取的元素图像时,仅需对同名点间距进行变换,使其与相应的三维影像重构系统透镜参数相一致,就可以恢复出正确的重构图像的三维景物像距。

下面将依据上述方法,解决当采用相机阵列获取元素图像时,作为三维景物获取系统的相机阵列焦距和相机间距等参数与三维影像重构系统的透镜阵列参数不匹配的问题。为此,将重新推导同名点间距公式,并将该同名点间距等效至基于透镜阵列的三维影像重构系统中。相机阵列获取元素图像示意图如图 2 所示,参考平面上一点 A,经相机 1 和相机 2 分别成像在对应的 CCD 上,得到同名像点 A_1, A_2 。 θ_1, θ_2 为对应张角, A 点成像物距为 x ,相机阵列间距为 p_{ca} ,相机 1 与 A 在垂直方向的距离为 p_1 ,相机 2 与 A 在垂直方

向的距离为 p_2 , 相机焦距为 f_{ca} 。 A_1 偏离 CCD 中心位置 p_1' , A_2 偏离 CCD 中心位置 p_2' , p_{elem} 为元素图像的间距。 p_{ca}' 为相机阵列获取元素图像系统中同名点间距。

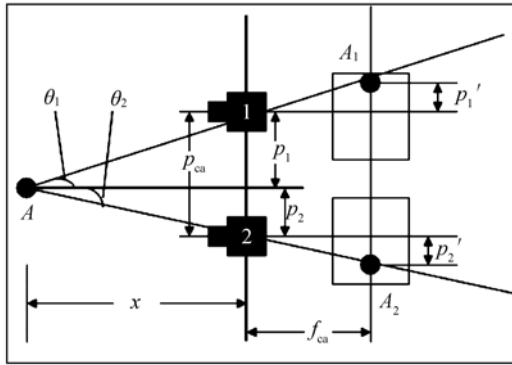


图 2 相机阵列获取元素图像

Fig. 2 Capturing elemental images using camera array

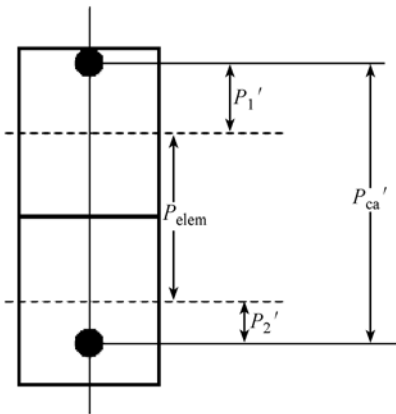


图 3 元素图像排列

Fig. 3 Arrangement of elemental images

同名点间距表达式可由下式推导出, 根据正切公式可知,

$$\tan \theta_1 = \frac{p_1}{x} = \frac{p_1'}{f_{ca}}, \tan \theta_2 = \frac{p_2}{x} = \frac{p_2'}{f_{ca}}, \quad (2)$$

将 2 式相加可得:

$$\frac{p_1 + p_2}{x} = \frac{p_1' + p_2'}{f_{ca}}, \quad (3)$$

根据 $p_1 + p_2 = p_{ca}$, $p_{ca}' = p_{elem} + p_1' + p_2'$, 并将其代入到式(3)中, 则得到同名点间距表达式为:

$$p_{ca}' = p_{elem} + \frac{p_{ca} f_{ca}}{x}. \quad (4)$$

在三维影像重构系统中, 需将式(4)计算出的

通过相机阵列获取的同名点间距转化为基于透镜阵列三维影像重构系统中的同名点间距, 为减小串扰, 取元素图像大小为透镜尺寸, 可以得到:

$$\frac{p_{ca}'}{p'} = \frac{p_{elem}}{p_{lens}}$$

$$p' = p_{ca}' \times \frac{p_{lens}}{p_{elem}} = \frac{p_{lens}}{p_{elem}} \times \left(p_{elem} + \frac{p_{ca} f_{ca}}{x} \right) =$$

$$p_{lens} \times \left[1 + \frac{p_{ca} f_{ca}}{x \cdot p_{elem}} \right], \quad (5)$$

将式(5)代入式(1), 得到重构像距为:

$$l' = f_{lens} \frac{p'}{(p' - p_{lens})} = f_{lens} \times \left[\frac{x \cdot p_{elem}}{p_{ca} \cdot f_{ca}} + 1 \right]. \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 重构像距与相机阵列获取端拍摄距离 x 有关。不同平面的场景物距不同, 则同名点间距也不同。由式(5)可知, x 越大, 同名点间距越小, 最后重构像距则越大。当用透镜阵列记录场景时, 获取时物距越大, 重构的像距就越大。对应于相机阵列记录场景, 该关系仍然存在, 只不过不再是镜像关系, 而是有一个变换公式。通过该变换公式, 对不同场景进行同名点计算, 可将相机阵列获取端不同的物距与透镜阵列重构端的像距一一对应, 得到不同的同名点间距, 对应不同的重构深度。

3 实验结果与讨论

为了验证本文所提理论, 采用相机阵列为三维景物获取系统进行了实验。为减少阵列相机的校对过程中所产生的误差, 通过对单相机的精密二维移动, 实现相机阵列功能。将单相机固定在电动二维平移台上, 其移动步长为 6 mm, 通过二维移动, 拍得 7×7 图像阵列。实验中采用的模型为字母 N 和 K, 如图 4 为实验中相机所拍摄元素图像之一。相机参数如下: 焦距为 25 mm, 分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$, CCD 靶面大小为 $8.53 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$, 长宽比为 4 : 3。字母 N 距镜头 43 cm, 即物距为 $x_N = 43 \text{ cm}$, 字母 K 距镜头 55 cm, 即物距为 $x_K = 55 \text{ cm}$, 而相机阵列间距 $p_{ca} = 6 \text{ mm}$ 。

在三维影像重构系统中, 采用 7×7 的透镜阵列, 厚度 $d = 8 \text{ mm}$, 方形孔径, 且边长为 5 mm, 整体尺寸为 $3.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$, 曲率半径为 $r = 9 \text{ mm}$, 折射率 $n = 1.4585$ 。由上述参数可计算出:

$$l_H' = \frac{d}{n} = 5.49 \text{ mm}, f = f' = \frac{r}{n-1} = 19.6 \text{ mm}.$$

其单个透镜参数示意图如图 5 所示。



图 4 相机阵列所拍场景

Fig. 4 Image from camera array

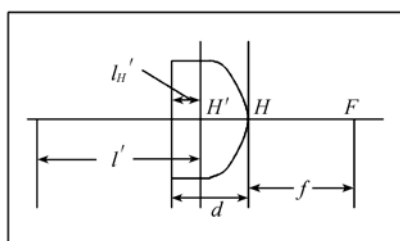


图 5 透镜阵列单一透镜参数示意图

Fig. 5 Model of lens array

通过相机阵列获得的元素图像分别计算 N 与 K 同名点间距,参数如表 1 所示。将其拼接成元素图像阵列,采用投影显示的方式成像在透镜阵列前,调整元素图像阵列大小,使其与透镜阵列大小一致为 3.5 cm,分别得到字母 N 的重构清晰像与重构像距,如图 6(a),6(b)所示,字母 K 的重构清晰像与重构像距如图 6(c),6(d)所示。

表 1 2 种不同同名点间距的元素图像的计算参数

Tab. 1 Parameters of two elemental images with different SCIPs

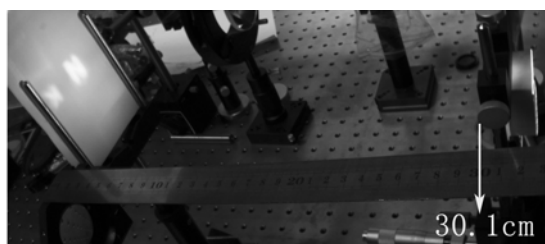
场景	字母 N	字母 K
元素图像规格 /pixel×pixel	600×600	600×600
获取物距 x/cm	43	55
P_{elem}/mm	5	5
P'_{ca}/mm	5.35	5.27
l'/mm	300.25	383.39

实验结果表明,用相机阵列获取元素图像,经



(a) N 重构清楚

(a) reconstructed image of N



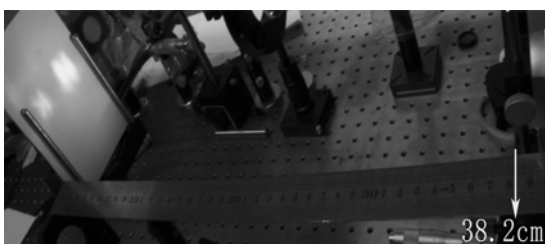
(b) 重构像距为 30.1 cm

(b) reconstructed distance, equal to 30.1 cm



(c) K 重构清楚

(c) reconstructed image of K



(d) 重构像距为 38.2 cm

(d) reconstructed distance, equal to 38.2 cm

图 6 元素图像阵列重构像距的实验结果

Fig. 6 Experimental results of reconstructed image distances with elemental image array

过同名点间距的计算和调整,就可以用光学参数与获取时不同的透镜阵列显示,重构出所记录的三维场景。由公式(5)、(6)可以得到,不同的获取物距,得到不同的同名点间距,三维影像重构距离

也不同。针对不同获取距离的场景 N 和 K, 得到不同的重构距离。字母 N 计算得到重构距离为 30.03 cm, 实验结果 30.1 cm; 字母 K 计算得到重构距离为 38.34 cm, 实验结果为 38.2 cm, 理论计算与实验相一致。

4 结 论

本文介绍了一种采用同名点间距变换实现元

素图像阵列与透镜阵列显示参数匹配的方法, 理论分析与实验结果表明, 不同的获取端距离, 得到了不同的同名点间距, 且重构的距离也不一样。通过与透镜阵列参数匹配的同名点间距变换处理, 可实现不同重构像距景物的精确再现。该方法不仅可以应用于通过相机阵列获取的元素图像显示的匹配, 还可以应用于其它方法(如数值方法等)获取的元素图像的匹配处理, 对拓展集成成像技术的应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王琼华. 3D 显示技术与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
WANG Q H. *Three Dimensional Display Technology and Device* [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 王琼华, 王爱红. 三维立体显示综述[J]. 计算机应用, 2010, 30(3): 579-588.
WANG Q H, WANG A H. Survey on stereoscopic three dimensional display[J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(3): 579-588. (in Chinese)
- [3] 孔令胜, 南敬实, 荀显超. 平面三维显示技术的研究现状[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 112-118.
KONG L SH, NAN J SH, XUN X CH. Research status quo of flat 3-D display technology[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 112-118. (in Chinese)
- [4] LIPPMANN G. La photographie integral[J]. *C. R. Acad. Sci.*, 1908, 146: 446-451.
- [5] CHO M, MOON I, JAVIDI B, *et al.*. Three-dimensional optical sensing and visualization using integral imaging [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(4): 556-575.
- [6] CHOAND M, JAVIDI B. Computational reconstruction of three-dimensional integral imaging rearrangement of elemental image pixels[J]. *J. Display technol.*, 2009, 5(2): 61-65.
- [7] WANG Q H, DENG H, JIAO T T, *et al.*. Imitating micro-lens array for integral imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(5): 512-514.
- [8] 焦甜甜, 王琼华, 李大海, 等. 基于 3D SMAX 的集成成像研究[J]. 液晶与显示, 2008, 23(5): 621-624.
- [9] 王爱红, 王琼华, 李大海, 等. 立体显示中立体深度与视差图获取的关系[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 433-437.
WANG A H, WANG Q H, LI D H, *et al.*. Relationship between stereo depth and parallax image captured in stereoscopic display[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 433-437. (in Chinese)
- [10] 张超, 王琼华, 李大海, 等. 基于 SIFT 匹配算法的多视点自由立体显示视差图像的生成[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 1990-1993.
ZHANG CH, WANG Q H, LI D H, *et al.*. Acquisition of parallax images for multi-view auto-stereoscopic display based on SIFT matching algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 1990-1993. (in Chinese)
- [11] 周磊, 王琼华, 陶宇虹, 等. 自由立体显示用柱面透镜光栅的优化设计[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3506-3510.
ZHOU L, WANG Q H, TAO Y H, *et al.*. Optimum design of lenticular lens for auto-stereoscopic display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3506-3510. (in Chinese)
- [12] MARR D, POGGIO T. Cooperative computation of stereo disparity[J]. *Science*, 1976, 194(4262): 283.
- [13] JAVIDI B, PONCE-DIAZ R, HONG S H. Three-dimensional recognition of occluded objects by using computational integral imaging [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(8): 1106-1108.
- [14] LI Y, ABOOKASIS D, ROSEN J. Computer-generated holograms of three-dimensional realistic ob-

jects recorded without wave interference[J]. *Applied optics*, 2001, 40(17):2864-2870.

- [15] 袁小聪, 徐于萍, 杨勇, 等. 基于相机阵列获取元素图像的集成成像抗串扰参数设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2050-2055.

YUAN X C, XU Y P, YANG Y, *et al.*. Design parameters of elemental images formed by a camera array for crosstalk reduction in integral imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2050-2055. (in Chinese)

作者简介:



杨 勇(1972—),男,天津人,副教授,主要从事机器视觉、三维成像与显示等方面的研究。E-mail: yangyong@nankai.edu.cn



步 敬(1964—),女,天津人,硕士,实验师,主要从事光学微细加工以及微光学元件应用研究。E-mail: jingbu@nankai.edu.cn



徐于萍(1987—),女,江西人,硕士研究生,主要从事三维显示方面的研究。E-mail: annyxyu_013@163.com



袁小聪(1963—),男,上海人,教授,博士生导师,主要从事微光学、光学显微成像与传感、光镊等方面的研究。E-mail: xcyuan@nankai.edu.cn



赵 星(1980—),男,天津人,博士,讲师,主要从事光学信息处理以及光学系统设计等领域的研究工作,目前从事新型三维成像与显示技术的相关研究。E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn