

集成成像同名像点三维形貌获取方法

张雷¹, 焦小雪^{1*}, 周立秋², 赵星²

(1. 河北工程大学理学院, 河北邯郸 056038;

2. 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: 为了实现被动式三维形貌获取技术, 首先利用光线追迹方法从理论上对集成成像阵列式多角度图像获取技术进行了深入分析; 对于元素图像阵列中同名像点的间距和三维物点位置之间的关联性进行了理论分析; 在此基础上提出了集成成像同名像点三维形貌获取方法。实验结果显示, 本文提出的集成成像同名像点三维形貌获取技术能够获取三维物体的三维形貌和任意三维点的空间坐标。定量实验结果显示获取结果相对误差小于5%, 证实了本文提出的基于集成成像同名像点三维形貌获取技术能够实现三维信息的光学获取。

关键词: 集成成像; 同名像点; 三维形貌

中图分类号: O439; TP751.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150801.0045

Three-dimensional shape acquisition method by integral imaging based on corresponding points

ZHANG Lei¹, JIAO Xiao-xue^{1*}, ZHOU Li-qiu², ZHAO Xing²

(1. School of Science, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

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

* Corresponding author, E-mail: XXJiao@hebeu.edu.cn

Abstract: In order to realize the passive three-dimensional(3D) shape acquisition technology, the ray tracing is used to analyze the processing of pick-up information by the integral imaging system, and the relationship in the corresponding points is shown under the theoretical analysis. Then, the 3D shape acquisition technology by integral imaging based on the relationship of the corresponding points is proposed. The optical results show that the coordinates of points in the object space can be captured by the proposed technology. The 3D shape can be reconstructed from the corresponding points. The coordinates of the object point can be calculated. The relative error is smaller than 5%. The result confirms the feasibility of our proposed method to realize the acquisition for 3D optical information.

Key words: integral imaging; corresponding points; three-dimensional shape

1 引言

集成成像是一种新型的三维成像与显示技术。在显示领域,集成成像^[1-2]作为一种无需眼镜的裸眼三维显示技术具有真三维和连续视场等优点。而在成像领域,集成成像^[3-5]是一种非接触式的被动光学三维形貌^[6]记录技术。与接触式三维形貌获取技术或者主动式光学三维形貌技术相比,集成成像具有极大的优势。

以三坐标测量机为代表的接触式三维形貌获取技术发展时间长,技术成熟。但是因为需要接触被测物体,存在接触误差和测量范围受限等等问题。而以结构光测量^[7-13]为代表的非接触式三维形貌获取技术克服了接触式测量的缺点,具有可快速提供全场信息、分辨率高、应用范围广、便于实现自动化人工干预等优点而被公认为相当有前途的三维形貌获取技术。

集成成像^[1-5,13-16]作为一种被动式多视点三维形貌获取技术保留光学非接触测量优点的同时克服了主动式三维形貌获取技术的缺点,实现了被动式非接触三维形貌获取。

本文提出了一种基于同名像点的集成成像三维形貌数据获取的方法。集成成像三维形貌获取技术是利用透镜阵列/相机阵列获取得到元素图像阵列,通过理论分析得到元素图像阵列中同名像点相对位置和三维物点空间位置之间的关联关系。结合透镜阵列/相机阵列的参数即可得到三维物点的空间位置。光学实验结果显示,集成成像同名像点三维形貌获取方法能够有效获得待测三维物体的三维形貌数据。定量分析结果显示相对误差小于5%。光学实验证明了基于同名像点的集成成像三维形貌获取技术的有效性,且该方法具有非接触、适应能力强、快速高效、准确、柔性好、可靠性高、操作简便和成本低等特点。

2 集成成像三维信息获取原理

集成成像是利用透镜阵列/相机阵列这种阵列型器件将不同角度的三维信息记录到透镜/相

机对应的元素图像中,然后元素图像组合成为元素图像阵列。原理如图1所示。

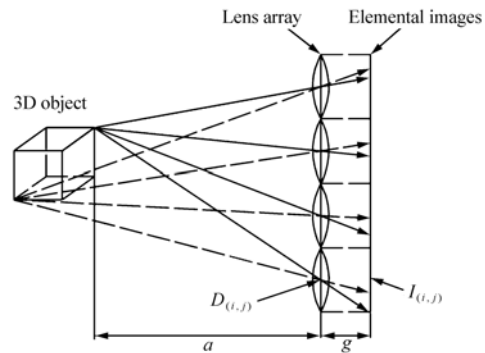


图1 集成成像三维信息获取原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of principle of integral imaging 3D picked-up technology

图1中,三维物体经过透镜阵列记录得到元素图像阵列。其中 g 是元素图像阵列到透镜阵列的距离, a 是物点到透镜阵列的距离。 $D_{(i,j)}$ 是透镜阵列中位于 (i,j) 的子透镜。 $I_{(i,j)}$ 是与 $D_{(i,j)}$ 对应的元素图像。对于物点 O 来说,其由 $D_{(i,j)}$ 成像到 $I_{(i,j)}$ 的像点 $O'_{(i,j)}$,元素图像阵列中所有的 $O'_{(i,j)}$ 的集合定义为 O 的同名像点。如图2所示。

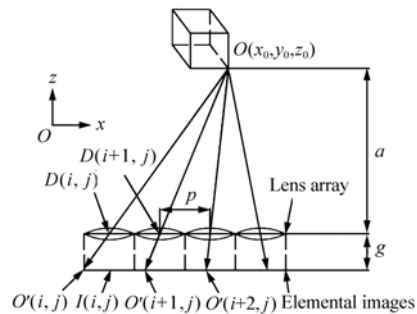


图2 同名像点示意图

Fig.2 Sketch of corresponding points

3 同名像点间的关联性

本节将利用光线追迹的方法来深入分析同名像点之间的关联性。坐标系设定如图2所示。

图2中,物点 O 的坐标为 $O(x_0, y_0, z_0)$ 。透镜阵列中第 (i,j) 个透镜的光心坐标为 $D_{(i,j)}$

$(x_{D(i,j)}, y_{D(i,j)}, z_{D(i,j)})$ 。与 $D_{(i,j)}$ 对应的元素图像中物点 O 的同名像点坐标为 $O'_{(i,j)}$ ($x_{O'(i,j)}, y_{O'(i,j)}, z_{O'(i,j)}$)。元素图像阵列到透镜阵列距离为 g , 物点到透镜阵列距离为 a 。透镜阵列中相邻子透镜间距为 p (透镜视作正方形透镜)。

根据透镜成像公式可知 $O, D_{(i,j)}$ 和 $O'_{(i,j)}$ 之间的关系为:

$$\begin{cases} x_0 - x_{D(i,j)} = \beta \times x_{O'(i,j)} \\ y_0 - y_{D(i,j)} = \beta \times y_{O'(i,j)} \\ \beta = \frac{a}{g} \frac{z_0 - z_{D(i,j)}}{z_{O'(i,j)} - z_{D(i,j)}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $\beta = a/g$ 。对于周期性排布的透镜阵列而言, 透镜阵列中 $D_{(i,j)}$ 和 $D_{(i+m,j+n)}$ 光心坐标之间的关系为:

$$\begin{cases} x_{D(i+m,j+n)} = x_{D(i,j)} + m \times p \\ y_{D(i+m,j+n)} = y_{D(i,j)} + n \times p \\ z_{D(i+m,j+n)} = z_{D(i,j)} \end{cases}, \quad (2)$$

式(2)表示了透镜阵列中任意两个子透镜其光心坐标之间的关系。结合式(1)和式(2)可以得到经由任意两个子透镜 $D_{(i,j)}$ 和 $D_{(i+m,j+n)}$ 成像的同名像点 $O'_{(i,j)}$ 和 $O'_{(i+m,j+n)}$ 的坐标:

$$\begin{cases} x_0 - x_{D(i,j)} = \beta \times x_{O'(i,j)} \\ x_0 - x_{D(i+m,j+n)} = \beta \times x_{O'(i+m,j+n)} \end{cases}, \quad (3)$$

式(2)和式(3)联立可以得到同名像点中任意两个同名像点之间的关系:

$$x_{O'(i,j)} = x_{O'(i+m,j+n)} + m \times \frac{p}{\beta}, \quad (4)$$

式中, p 是相邻透镜光心间距。

当 $m=1$ 和 $n=1$ 时, 可以得到 O 点被相邻透镜所获取的同名像点之间的关系为:

$$\begin{cases} x_{O'(i,j)} = x_{O'(i+1,j+1)} + \frac{p}{\beta} \\ y_{O'(i,j)} = y_{O'(i+1,j+1)} + \frac{p}{\beta} \end{cases}, \quad (5)$$

式(5)中, $x_{O'(i,j)}$ 和 $x_{O'(i+1,j+1)}$ 是同名像点 $O'_{(i,j)}$ 和 $O'_{(i+1,j+1)}$ 的坐标。将式(1)~式(5)联立可以得到物点 O 的坐标:

$$\begin{cases} z_0 = \frac{p}{x_{O'(i,j)} - x_{O'(i+1,j+1)}} \times g + z_{D(i,j)} \\ x_0 = \frac{p}{x_{O'(i,j)} - x_{O'(i+1,j+1)}} \times x_{O'(i,j)} + x_{D(i,j)} \\ y_0 = \frac{p}{y_{O'(i,j)} - y_{O'(i+1,j+1)}} \times y_{O'(i,j)} + y_{D(i,j)} \end{cases}, \quad (6)$$

式中, $O'_{(i,j)}$ ($x_{O'(i,j)}, y_{O'(i,j)}$) 和 $O'_{(i+1,j+1)}$ ($x_{O'(i+1,j+1)}, y_{O'(i+1,j+1)}$) 的坐标可以由对应的元素图像阵列读取得到, p 是相邻透镜的光心间距, g 是元素图像阵列到透镜阵列的距离。其中 p 和 g 均可以直接测量得到。在指定 $D_{(i,j)}$ 光心坐标 $x_{D(i,j)}$ 和 $y_{D(i,j)}$ 的情况下, 可以得到物点 O 的空间坐标 x_0, y_0, z_0 。

4 集成成像同名像点三维形貌获取技术

从上述的分析中可以得知, 若要获得物点 O 的空间坐标, 只需要测量透镜阵列/相机阵列中透镜/相机间隔 p 和元素图像阵列到透镜阵列的距离 g 。从元素图像阵列中提取同名像点坐标序列 $O'_{(i,j)}$ ($i=1, 2, 3 \dots M; j=1, 2, 3 \dots N$), $M \times N$ 是透镜阵列中子透镜的个数。相邻同名像点坐标差值 Δ 可以由逐差法计算得到:

$$\Delta = \begin{cases} \Delta x = x_{O'(i,j)} - x_{O'(i+1,j)} = \\ \frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} \left[\frac{1}{m_2} (x_{O'(i,j)} - x_{O'(i+m_2,j)}) \right] \\ \Delta y = y_{O'(i,j)} - y_{O'(i+1,j)} = \\ \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \left[\frac{1}{n_2} (y_{O'(i,j)} - y_{O'(i,j+n_2)}) \right] \end{cases}, \quad (7)$$

式中, m_1 和 n_1 是逐差法的分组个数, m_2 和 n_2 是每组两个数据的位置序号差。一般情况下 $m_1 = m_2 = M/2$ 和 $n_1 = n_2 = N/2$ 。得到相邻坐标点差值 Δ 之后, 结合 $D_{(1,1)}$ 子透镜光心坐标, 根据式(6)即可计算得到物点 O 的坐标。

5 光学实验及结果

利用相机和一维电动平移台构建了一套集成成像同名像点三维形貌获取系统, 如图3所示。

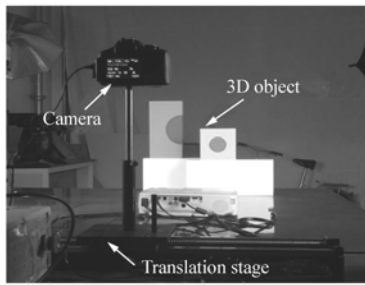


图 3 光学实验装置

Fig. 3 Setup of the optical experiment

实验中采用相机扫描的方法来构建相机阵列获取系统。相机型号为 Canon EOS 600D。M 档, 曝光时间 $1/100$ s, 光圈 4.5。为了保证元素图像对焦位置的一致性, 平移采集过程中关闭相机的自动对焦功能。相邻相机的间隔 p 由一维电动平移台控制。光学获取系统的参数如表 1 所示。

表 1 集成成像光学获取系统参数

Tab. 1 Result of system scale calibration

系统参数	g	29 mm
	p	20 mm
相机	分辨率	720×480
	CCD 尺寸	$22.3 \text{ mm} \times 14.9 \text{ mm}$
	相机阵列	18 列 \times 1 行
平移台	精度	0.005 mm
	长度	500 mm

图 4 中待记录物体由彩色积木搭建而成。其中黄色积木距离相机较近、粉色积木距离相机较远。为了定量分析我们所提方法的精度, 选取了待记录物体上 A, B 和 C 三点, 并测量了 AB、BC 和 AC 之间的距离。其中 $l_{AB} = 265 \text{ mm}$, $l_{BC} = 140 \text{ mm}$, $l_{AC} = 360 \text{ mm}$ 。通过对比系统拍摄得到的 AB、BC 和 AC 之间的距离与测量得到的距离来定量分析本系统的所采用方法的精度。拍摄得到的元素图像阵列如图 5 所示。通过图 5 所示的元素图像阵列可以看出, 一维相机阵列拍摄到的图像与相机的位置有着直接的关系。相机平移使得拍摄到的物体随之平移。对比第 1 张元素图像和第 18 张元素图像可以看出, 物体在元素图像中的位置存在明显的不同。第 1 张元素图像中两块积木偏左, 而在第 18 张元素图像中两块积木的位置偏

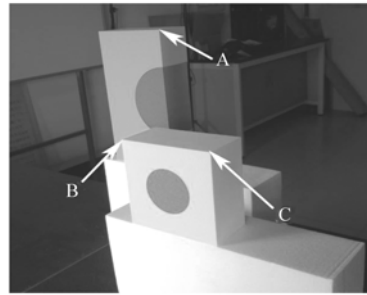


图 4 待拍摄物体

Fig. 4 Object to be recorded

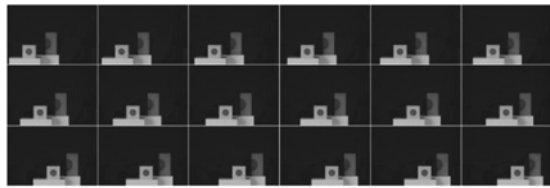


图 5 元素图像阵列

Fig. 5 Elemental images

右。而且黄色积木和粉色积木的相对位置也存在差异。第 1 张元素图像中两块积木的间距明显大于第 18 张元素图像中两块积木的间距。

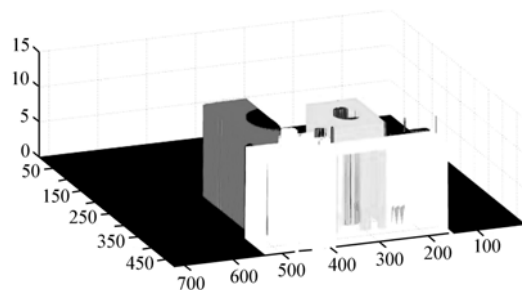


图 6 再现三维像

Fig. 6 Reconstructed 3D image

利用本文提出的集成成像同名像点三维信息获取方法可以得到待记录物体的三维形貌, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 再现得到的三维像中黄色积木的位置比粉色积木的位置距离镜头要近。三维再现像与图 4 待拍摄物体对比可以看出, 两者基本一致。

为了定量分析本文所提方法的精度, 从三维再现形貌中提取得到 A, B 和 C 三点的空间坐标。首先利用图像提取算法得到 A, B 和 C 三点的同

名像点坐标 $A'i$, $B'i$ 和 $C'i$ 。然后利用式(7)算得到 $\Delta A'$, $\Delta B'$ 和 $\Delta C'$ 。设定 D_1 的坐标为 $(0, 0, 0)$, 即可根据式(6)得到 A、B 和 C 三点的坐标:

A 点: (349 mm, -340 mm, 1487 mm)

B 点: (516 mm, -431 mm, 1289 mm)

C 点: (656 mm, -431 mm, 1289 mm)

然后可以计算得到三点之间的距离 $l'_{AB} = 275$ mm, $l'_{BC} = 140$ mm, $l'_{AC} = 376$ mm。与测量值对比可以得到如表2所示的结果。表2中相对误差 = |计算值 - 测量值| / 测量值 × 100%。

表2 光学实验结果
Tab.2 Result of the optical experiment

	测量值	计算值	相对误差
l_{AB}	265 mm	275 mm	3.8%
l_{BC}	140 mm	140 mm	0.0%
l_{AC}	360 mm	375 mm	4.2%

测量结果显示,本文所采用的集成成像同名像点三维形貌获取技术能够获取得到三维物体的空间形貌,而且能够定量得到空间点的三维坐标,针对本文中三维物体上的 A、B 和 C 三点,分析结

参考文献:

- [1] 张雷,杨勇,赵星,等.多级投影式集成成像三维显示的视场角拓展[J].光学精密工程,2013,21(1):1-6.
ZHANG L, YANG Y, ZHAO X, et al.. Enhance of viewing angle of multi-stage projection-type integral imaging 3D display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):1-6. (in Chinese)
- [2] 张雷,杨勇,赵星,等.基于小发散角的投影式集成成像三维显示再现深度的拓展[J].光学精密工程,2012,20(6):1159-1165.
ZHANG L, YANG Y, ZHAO X, et al.. Enhancement of field depth for projection-type integral imaging three-dimensional display based on small diverging angle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1159-1165. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] JIAO X X, ZHAO X, YANG Y, et al.. Dual-camera enabled real-time three-dimensional integral imaging pick-up and display [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25):27304-27311.
- [5] ZHANG L, YANG Y, ZHAO X, et al.. Enhancement of depth-of-field in a direct projection-type integral imaging system by a negative lens array [J]. *Optics Express*, 2012, 20(23):26021-26026.
- [6] 陈晓荣,蔡萍,施文康.光学非接触三维形貌测量技术新进展[J].光学精密工程,2002,10(5):528-532.
CHEN X R, CAI P, SHI W K. The latest development of optical non-contact 3D profile measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5):528-532. (in Chinese)
- [7] 戴美玲,杨福俊,何小元.基于双频彩色光栅投影测量不连续物体三维形貌[J].光学精密工程,2013,21(1):7-12.
DAI M L, YANG J F, HE X Y. Three-dimensional shape measurement of objects with discontinuities by dual-frequency

果显示对于同一平面上的 B 点和 C 点其误差较小,而对于非同一平面上的 A 点误差较大,其获取结果相对误差约为 5%。初步分析认为,这是采用集成成像三维形貌获取方法,其轴向分辨率和横向分辨率不对等造成的不同平面误差较大。

5 结论

本文根据现代工业检测精度高、速度快的要求,提出了非接触光学三维形貌获取方法。借助于集成成像这种阵列式获取器件,利用同名像点之间的关联性,建立了集成成像三维形貌获取方法,实现了三维形貌的被动式光学非接触三维形貌获取。首先利用光线追迹的方法从理论上分析了集成成像元素图像阵列获取技术;给出了元素图像阵列中同名像点关联性的理论解释;在此基础上提出了集成成像同名像点三维形貌获取方法。实验结果显示,本文提出的集成成像同名像点三维形貌获取技术能够获取三维物体的三维形貌,在给定坐标零点的情况下能够得到三维物体上各点的三维坐标。

- color fringe projection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):7-12. (in Chinese)
- [8] 李旭东, 崔磊, 赵慧洁, 等. 双振镜点扫描三维形貌测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7):1648-1653.
LI X D, CUI L, ZHAO H J, *et al.*. Three-dimensional shape measurement system based on dual oscillating mirrors with point scanning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1648-1653. (in Chinese)
- [9] 邹文栋, 黄长辉, 郑瑜, 等. 用扫描白光干涉术检测合金韧窝断面微观三维形貌[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1612-1619.
ZOU W D, HUANG CH H, ZHENG C, *et al.*. Measurement of microscopic surface topography of alloy dimple fracture by scanning white-light interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1612-1619. (in Chinese)
- [10] 杨福俊, 耿敏, 戴美玲, 等. 基于单频四步相移条纹投影的不连续物体三维形貌测量[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(8):1535-1538.
YANG F J, GENG M, DAI M L, *et al.*. 3D shape measurement of discontinuous objects based on single frequency fringe projection in 4-step phase shifting profilometry[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(8):1535-1538. (in Chinese)
- [11] 叶海加, 陈昱, 邢渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1):71-75.
YE H J, CHEN G, XING Y. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):71-75. (in Chinese)
- [12] 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.
DENG H, LI SH L, WU F, *et al.*. Toed-in integral imaging with enhanced 3D viewing angle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):1-6. (in Chinese)
- [13] 郝劲波, 张建奇, 王晓蕊, 等. 集成成像系统实现三维物体旋转不变分类识别[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(2):350-356.
HAO J B, ZHANG J Q, WANG X R, *et al.*. Three-dimensional object rotation-tolerant classification and recognition based on integral imaging system[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(2):350-356. (in Chinese)
- [14] FRAUEL Y, TAJAHUERCE E, MATOBA Q, *et al.*. Comparison of passive ranging integral imaging and active imaging digital holography for three-dimensional object recognition[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(2):452-462.
- [15] KISHK S, JAVIDI B. Improved resolution 3D object sensing and recognition using time multiplexed computational integral imaging[J]. *Optics Express*, 2003, 11(26):3528-3541.
- [16] ERAUEL Y, JAVIDI B. Digital three-dimensional image correlation by use of computer-reconstructed integral imaging [J]. , 2002, 41(26):5488-5496.

作者简介:



张雷(1983—),男,河北邯郸人,博士,讲师,2013年于南开大学获得博士学位,主要从事三维成像与显示技术研究。E-mail:LZhang@hebeu.edu.cn



赵星(1980—),男,天津人,博士,副教授,2007年于南开大学获得博士学位,主要从事光学信息处理、光学系统设计、新型三维成像与显示技术等方面的研究。E-mail:zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn



焦小雪(1982—),女,河北邯郸人,博士,讲师,2012年于南开大学获得博士学位,主要从事三维成像与显示技术方面的研究。E-mail:XXJiao@hebeu.edu.cn



周立秋(1989—),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事三维成像与显示技术方面的研究。E-mail:fallwar@126.com