

# 基于三维集成成像相机阵列获取的元素图像校正

焦小雪 赵星\* 杨勇 方志良 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** 利用相机阵列获取三维信息实现三维集成成像与显示时,为消除相机阵列空间位置偏差对元素图像阵列的影响,提高再现三维图像的质量,以相机阵列记录系统为基础提出了一种元素图像阵列校正方法。通过特征点位置坐标以及相机位置平移误差和旋转误差的计算,分析了相机阵列位置平移误差和旋转误差与元素图像间的关系,以及校正算法的精度。利用光学实验对该算法进行了验证,结果表明,此方法可有效消除相机阵列位置偏差对元素图像阵列的影响,并且校正后再现三维图像质量明显优于误差图像,峰值信噪比提高了33.6%,实现了基于三维集成成像相机阵列获取的元素图像校正,满足了集成成像的显示要求。

**关键词** 图像处理;三维成像与显示;集成成像;元素图像校正

**中图分类号** O439; TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0309001

## Elemental Images Correction of Camera Array Pick-up for Three-Dimensional Integral Imaging

Jiao Xiaoxue Zhao Xing Yang Yong Fang Zhiliang Yuan Xiaocong

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

**Abstract** A method is presented to correct the errors of elemental images due to position deviation of cameras in the process of camera array pick-up of three-dimensional (3D) integral imaging. By calculating position coordinates of reference points and position errors of camera array, the accuracy of correction algorithm and the relationship between position errors of camera array and elemental images are analyzed. Optical experimental results verify the feasibility of the proposed method. The results show that, the proposed method can effectively eliminate the effect of position deviation of camera array on the elemental images array and the reconstruction 3D images with better quality can be achieved after correction. The comparison of reconstruction 3D images before and after correction indicates that the errors of elemental images captured by camera array are corrected successfully with value of peak signal to noise ratio 33.6 percent improved, which can satisfy the display requirement of integral imaging.

**Key words** image processing; three-dimensional imaging and display; integral imaging; elemental images correction

**OCIS codes** 100.6890; 110.1758; 110.2960; 110.5200; 110.6880

## 1 引 言

三维集成成像技术作为一种新型的三维成像与显示技术,以其连续视场角和无需辅助器件的优势成为近年来三维技术领域的热点问题之一<sup>[1,2]</sup>。目

前三维集成成像技术的记录通常采用两种方法:1)采用透镜阵列光学获取物体的三维信息<sup>[3~5]</sup>,2)采用计算机模拟生成元素图像(EI)阵列<sup>[6~9]</sup>。前者很难获取真实大场景物体的三维信息,并且透镜阵列

收稿日期:2011-10-09;收到修改稿日期:2011-11-17

基金项目:国家973计划(2010CB327702)资助课题。

作者简介:焦小雪(1982—),女,博士研究生,主要从事三维成像与显示技术等方面的研究。

E-mail: jiaoxiaoxue267@163.com

导师简介:方志良(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事应用光学、光学信息处理、图像处理等方面的研究。

E-mail: zlfang@nankai.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn

制作工艺的限制会导致图像分辨率过低,而相邻子透镜间的互相干扰易导致再现三维图像出现串扰<sup>[10~13]</sup>;后者由于计算机技术的限制,导致其很难进行真实大场景的模型设计,并且存在生成速度、定位及视角分析等问题<sup>[10]</sup>,两者均会直接影响图像质量及观察效果。而采用相机阵列获取物体三维信息的方法既能提供集成成像研究所需要的各种真实大场景高分辨率的图像来源,又能克服透镜阵列获取物体三维信息所存在的问题,具有重要的现实意义及学术价值。但是在采用相机阵列获取物体的三维信息时,每个相机的个体空间位置偏差容易引起元素图像的空间几何失真,对元素图像阵列产生较大的影响,这对于基于相机阵列的三维集成成像获取技术是一个至关重要的问题。

目前在三维成像与显示领域,Vaish等<sup>[14]</sup>采用平板结合视差校正的方法校正相机阵列获取双目视差图像对,实现三维物体的识别与追踪;Taguchi等<sup>[15]</sup>采用基于张正友相机标定法<sup>[16]</sup>的集成照相术进行双目视差图像源的获取。这些方法基本上是对水平排布的多个相机的内外参数进行标定,用于传统的基于双目视差原理的三维成像与显示、图像识别与追踪和三维建模等,无法直接应用于三维集成成像技术。在三维集成成像技术的研究中,已有的报道通常针对的是透镜阵列获取和显示过程中的问题,如Kawakita等<sup>[17]</sup>分析的是子透镜的像差对再现三维图像的影响, Lee等<sup>[18]</sup>校正了透镜阵列的整体空间位置偏差。但上述方法实现的前提是子透镜不存在个体空间位置偏差,而在相机阵列获取物体三维信息的实际应用中,相机阵列中每个相机分别具有不同的个体空间位置偏差,难以保证所有相机空间位置偏差的一致性。此外, Lee等方法在透镜阵列表面附加表面标记造成了记录过程中无法获取相应视角的物体三维信息。由此可见,上述方法均无法满足相机阵列获取元素图像中位置偏差校正的需要,因此,本文通过分析每个相机的空间位置偏差与元素图像间的关系,基于相机阵列的几何成像原理和图像处理方法,开展了基于相机阵列获取的元素图像校正方法的研究。通过特征点位置坐标以及相机的位置平移误差和旋转误差的计算,利用几何校正的方法对元素图像进行了校正,得到适用于集成成像显示要求的元素图像阵列。

## 2 几何校正原理

采用相机阵列获取物体三维信息时,如图1所

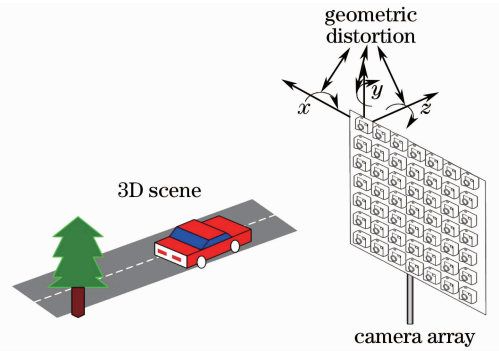


图1 采用相机阵列的集成成像记录阶段实验装置  
Fig. 1 Experimental setup using camera array in pick-up stage of integral imaging

示,相机阵列个体空间位置偏差所产生的元素图像的空间几何失真,即相对 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的平移误差和旋转误差,远大于成像物镜光学像差对元素图像的影响,因此重点对相机阵列的个体空间位置偏差进行校正。为此在三维场景中设置参考点,设理想相机阵列由 $m \times n$ 个相机组成,参考点在元素图像中的位置坐标记为 $(x_m, y_n)$ ,当相机阵列中的相机存在一定的空间位置偏差时,参考点在元素图像中的位置坐标记为 $(u_m, v_n)$ ,并满足关系<sup>[18]</sup>

$$\begin{bmatrix} u_m \\ v_n \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_m \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1nm} & a_{2nm} & a_{3nm} \\ a_{4nm} & a_{5nm} & a_{6nm} \\ a_{7nm} & a_{8nm} & a_{9nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为归一化误差矩阵,表示旋转、缩放和平移。为了减少相机空间位置偏差对再现三维图像质量的影响,需要对每个元素图像进行校正。而采用(1)式进行校正又过于复杂,为了提高处理速度,对此进行了简化:

$$\begin{bmatrix} u_m \\ v_n \end{bmatrix} = \mathbf{A}' \begin{bmatrix} x_m \\ y_n \end{bmatrix} + \mathbf{B}' = \begin{bmatrix} a'_{1nm} & a'_{2nm} \\ a'_{3nm} & a'_{4nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b'_{1nm} \\ b'_{2nm} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A}'$ 矩阵表示旋转和缩放, $\mathbf{B}'$ 表示平移。理论上,只要设置3个参考点,即可由(2)式计算得到阵列中每个相机对应的误差变换矩阵,再利用该误差变换矩阵对相应元素图像中的所有点进行如(2)式所示的坐标变换,从而实现元素图像的校正。该方法仅依据参考点的位置坐标求解误差变换矩阵,具有操作简单、校正速度快的特点。实际应用中,尽管选取的参考点数量越多,误差变换矩阵的求解精度越高<sup>[18]</sup>,但参考点数量过多还将引起运算量的增大和处理速度的降低。为了获得较为满意的校正精度和处理速度,采用4个参考点进行误差变换矩阵的求解。

### 3 计算分析与讨论

为了分析校正方法的精度并对其进行验证,进行了数值模拟和分析。在数值模拟中,采用 $7 \times 7$ 相机阵列模型,焦距为 20 mm,每个相机间隔为 5 mm,像面密接排列,采用  $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$  等间隔分布的网点作测试物体,网点个数为  $350 \times 350$ ,测试物体和相机阵列模型的间距为 100 mm,由此,根据理想成像理论计算系统的放大率,可以得到无误差时不同视角元素图像中等间隔网点的位置坐标 $(x_m, y_n)$ 。

实际应用中,采用相机阵列获取元素图像时,通常预先调整相机位置,使相机的空间位置误差处于较小的范围内,据此,在数值分析时,设置相机阵列

的误差范围:平移误差范围为 $-2.5 \sim 2.5 \text{ mm}$ ,旋转误差范围为 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 。在此范围内,针对 $x, y, z$ 轴,分别对相机阵列中所有相机赋予相同的平移误差值和旋转误差值,即可根据几何成像理论得到误差存在时不同视角元素图像中等间隔网点的位置坐标 $(u_m, v_n)$ ,分别选取元素图像沿 $x, y$ 方向距离图像对称中心 0.5 mm 处的 4 个网点作为参考点,代入(2)式求解相应的误差变换矩阵,由于其数量过多,因此只给出 9 个具有代表意义的误差变换矩阵,其中元素图像的位置用 $(m, n)$ 表示 $(m = n = 1, 2, \dots, 7)$ , $x$ 轴存在 $5^\circ$ 旋转误差时元素图像的误差变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} (1,1) & \dots & (1,4) & \dots & (1,7) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (4,1) & \dots & (4,4) & \dots & (4,7) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (7,1) & \dots & (7,4) & \dots & (7,7) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9962 & 0 & -0.5708 \\ 0 & 0.9928 & -20.6412 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} 0.9962 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9928 & -20.9993 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} 0.9962 & 0 & 0.5708 \\ 0 & 0.9928 & -20.6412 \end{bmatrix} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \begin{bmatrix} 0.9962 & 0 & -0.5708 \\ 0 & 0.9928 & -21.7155 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} 0.9962 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9928 & -21.7155 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} 0.9962 & 0 & 0.5708 \\ 0 & 0.9928 & -21.7155 \end{bmatrix} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \begin{bmatrix} 0.9962 & 0 & -0.5708 \\ 0 & 0.9928 & -22.7898 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} 0.9962 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9928 & -22.7898 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} 0.9962 & 0 & 0.5708 \\ 0 & 0.9928 & -22.7898 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3)$$

据此计算得到所有误差变换矩阵,并对误差元素图像进行校正,最后计算校正前后每个元素图像的均

方差(MSE),通过对比量化评价校正方法的精度,结果如表 1 和图 2 所示。

表 1 校正前后元素图像阵列中每个元素图像的 MSE

Table 1 MSE of each elemental image within elemental images before and after correction

mm

Error		$(m, n)$						
		(1,1)	(2,2)	(3,3)	(4,4)	(5,5)	(6,6)	(7,7)
Translation ( $x$ axes): 2.5 mm	Incorrected	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625
	Corrected	0	0	0	0	0	0	0
Translation ( $y$ axes): 2.5 mm	Incorrected	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625
	Corrected	0	0	0	0	0	0	0
Translation ( $z$ axes): 2.5mm	Incorrected	0.1537	0.1241	0.0989	0.0894	0.0989	0.1241	0.1573
	Corrected	0	0	0	0	0	0	0
Rotation ( $x$ axes): $5^\circ$	Incorrected	2.2316	2.2136	2.2068	2.2112	2.2272	2.2548	2.2945
	Corrected	0.1204	0.0781	0.0490	0.0387	0.0529	0.0843	0.1296
Rotation ( $y$ axes): $5^\circ$	Incorrected	2.2945	2.2548	2.2272	2.2113	2.2068	2.2136	2.2316
	Corrected	0.1292	0.0836	0.0524	0.0393	0.0503	0.0792	0.1214
Rotation ( $z$ axes): $5^\circ$	Incorrected	0.5626	0.4445	0.3553	0.3200	0.3553	0.4445	0.5626
	Corrected	0.0336	0.0268	0.0217	0.0197	0.0217	0.0268	0.0336

表 1 表示最大平移和旋转误差校正前后元素图像阵列中对角线元素图像的 MSE。 $x, y$ 轴平移误

差校正前每个元素图像 MSE 相同, $z$ 轴平移误差以及 $x, y, z$ 轴旋转误差校正前元素图像阵列从中心

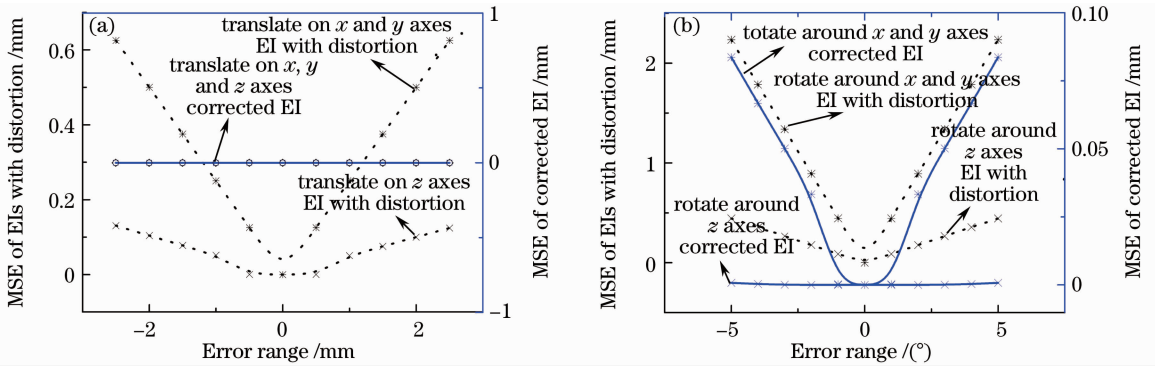


图 2 校正前后元素图像阵列的均方差与误差的关系

Fig. 2 Relationship between MSE and error of elemental images array before and after correction

到四周 MSE 逐渐变大。原因是，物体相对于每个相机的位置并不相同，其中， $x$ 、 $y$  轴平移误差导致图像上每个网点的位置仅存在  $x$ 、 $y$  方向平移变化，而  $z$  轴平移误差以及  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴旋转误差会导致不同视角元素图像在像面上同时产生不同程度的缩放和平移，进而产生相应的位置变化。平移误差校正后元素图像 MSE 为 0，说明采用该方法实现了对平移误差的完全校正。旋转误差校正后元素图像 MSE 由中心到四周逐渐增大，最大 MSE 为 0.1296 mm，近似等于  $0.4^\circ$  旋转误差存在时元素图像的 MSE，此时其最大残差小于相机阵列最大拍摄视场角的 5%，说明该方法可以实现对旋转误差的有效校正。

为进一步分析全部误差范围内上述校正方法的精度，通过计算阵列中所有元素图像 MSE 的平均

值，来对比不同误差下元素图像阵列校正前后的 MSE，结果如图 2 所示。其中由虚线的变化可知校正前平移或旋转误差越大，元素图像阵列的 MSE 越大，同时，旋转误差的影响明显大于平移误差；且与  $x$ 、 $y$  轴相关误差的影响远大于与  $z$  轴相关误差的影响。由实线的变化可知对不同的平移误差进行校正后，元素图像阵列的 MSE 基本为 0，对不同的旋转误差进行校正后，元素图像阵列的 MSE 明显减小但仍随误差的增大而增大，存在  $5^\circ$  旋转误差的元素图像阵列校正后最大 MSE 为 0.0837 mm，近似等于  $0.3^\circ$  旋转误差存在时的元素图像阵列的 MSE，此时其最大残差小于相机阵列最大拍摄视场角的 5%，说明该方法在上述误差范围内，可以对相机阵列中每个相机的空间位置偏差进行有效的校正。

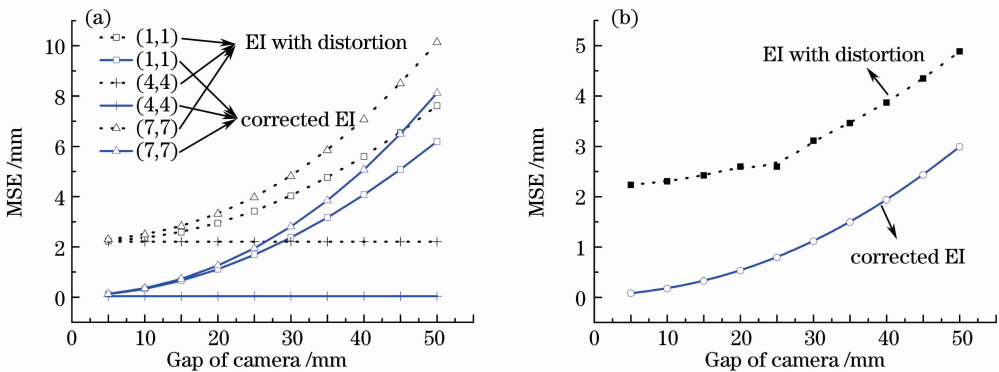


图 3 (a)校正前后每个元素图像的 MSE 与相机间隔的关系；(b)校正前后元素图像阵列的 MSE 与相机间隔的关系

Fig. 3 (a) Relationship between MSE of each elemental image and gap of camera before and after correction;

(b) relationship between MSE of elemental images array and gap of camera before and after correction

为了进一步说明相机间隔对元素图像阵列校正精度的影响，在以上数值模拟参数不变的基础上，仅改变相机间隔，由原来的 5 mm 扩展到 50 mm，相机误差为绕相机  $x$  轴旋转  $5^\circ$ ，分别获取了无误差元素图像阵列以及含  $x$  轴旋转误差的元素图像阵列，并经过计算获得校正后的元素图像阵列。分别计算其

相应的 MSE，结果如图 3 所示。随着相机间隔的增大，相机在阵列中的位置对于元素图像的 MSE 有较大影响，越靠近边缘的相机其影响越大，同时元素图像经校正后 MSE 明显下降，如图 3(a)所示。校正前元素图像阵列的 MSE 随着相机间隔的增大而增大，使用本文所述的校正方法对其进行校正后，

MSE 有明显下降,如图 3(b)所示。其中当相机间隔为 50 mm,且存在  $5^\circ$  旋转误差时,元素图像阵列校正后最大 MSE 为 2.9931 mm,近似等于  $3^\circ$  旋转误差存在时的元素图像阵列 MSE,但其最大残差仍小于相机阵列最大拍摄视场角的 5%,说明在上述情况下,采用该方法校正后的元素图像阵列仍可满足集成成像的显示要求。

## 4 实验与讨论

### 4.1 实验方法和装置

为通过实验对上述方法加以验证,采用了如下方法。首先在利用相机阵列获取物体三维信息时,根据相机阵列的排放位置,在三维场景中设置等臂“十”标记,并将两臂上的端点作为参考点。对由相机阵列获取的含有参考点的元素图像,采用 8 邻域角点提取算法<sup>[19]</sup>获取有误差存在时每个元素图像参考点的位置坐标,同时以阵列中心位置元素图像中的参考点为基准,根据空间位置关系计算得到无误差时每个元素图像中的参考点位置坐标,然后利用(2)式求解每个相机的误差变换矩阵,并对由此相机阵列拍摄实际大场景物体获得的元素图像进行几何校正。校正算法的流程如图 4 所示。

由上述方法的原理可知,该方法对于扫描式电荷耦合元件(CCD)阵列和固定式 CCD 阵列均可以实现有效的校正。受实验条件限制,本文采用 CCD 在二维平面内扫描的方式获取元素图像阵列。CCD 相机平移和旋转的随机误差,通过控制平移台和转

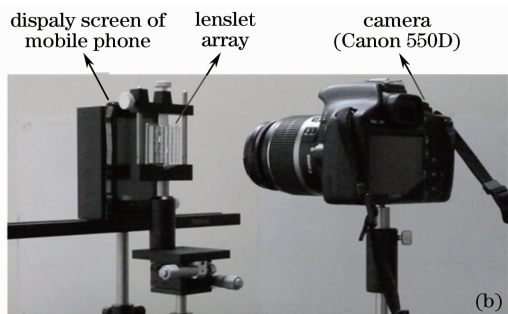
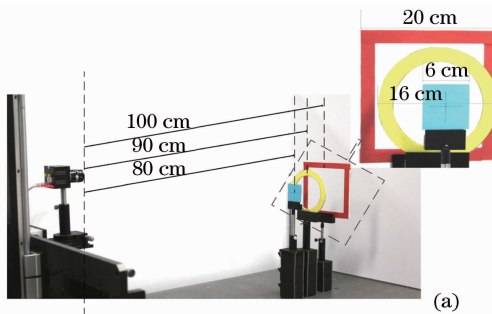


图 5 实验装置。(a) CCD 扫描获取装置;(b) 显示实验装置

Fig. 5 Experimental setup. (a) Pick-up setup of CCD scanning; (b) display setup

光学再现实验中采用液晶显示屏幕作为元素图像阵列的显示器件,实验系统如图 5(b)所示,具体参数如表 2 所示。

### 4.2 实验结果

CCD 扫描获取的元素图像阵列以及校正后的元素图像阵列如图 6 所示,光学三维再现结果如图 7 所示。虽然液晶显示屏幕分辨率的限制导致再

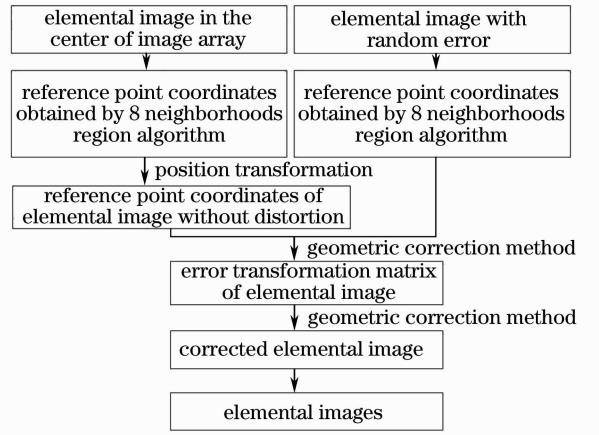


图 4 几何校正流程图

Fig. 4 Flow diagram of geometric correction

台的方式人为产生,且随机误差范围与数值模拟过程中的误差设定范围相同。实验装置如图 5(a)所示,其中二维扫描平移台的扫描精度为  $0.5 \mu\text{m}$ ,转台的精度为  $10'$ ,所使用的彩色面阵 CCD 的像素数为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。三维场景由间隔为 10 cm 的红色方形环、黄色圆环和蓝色正方形组成,其中蓝色正方形表面标有等臂“十”标记。为保证所有元素图像中都包含“十”参考点信息,设定 CCD 相机的扫描间隔为 2 cm,分别在无误差和有随机误差的情况下,对三维场景逐一进行拍摄,得到无误差的  $7 \times 7$  元素图像阵列,以及有随机平移和旋转误差的  $7 \times 7$  元素图像阵列,采用上述方法对误差元素图像阵列进行校正后,即可通过透镜阵列对其分别进行光学三维再现。

现三维图像的信噪比降低,图像模糊,而且透镜阵列的加工误差,以及单透镜自身较大的轴外像差,使再现三维图像边缘产生一定的畸变,但从图中仍然可以看出校正后的再现三维图像明显比校正前的再现三维图像清晰,基本达到了无误差时的三维再现效果。为了对再现结果的图像质量进行量化比较,分别计算了误差存在时校正前后三维再现图像的峰值

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

Component	Parameter	Value
Lenslet array	Lenslet number	7(H)×7(V)
	Focal length /mm	19.64
	Elemental lenslet /mm <sup>2</sup>	5×5
Camera	Model	Canon 550D
	Size /cm	7.112
Mobile phone	Resolution /pixel	360×640
	Pixel size /mm	0.097

信噪比(PSNR)<sup>[15]</sup>。如图 7 所示,对相机阵列的位

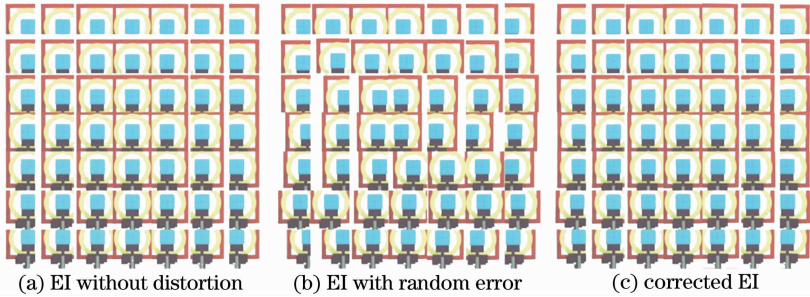


图 6 CCD 扫描获取的(a)无误差元素图像阵列、(b)存在误差的元素图像阵列以及(c)校正后的元素图像阵列  
Fig. 6 Original elemental images array (a) without distortion, (b) elemental images array with random error, and (c) corrected elemental images array obtained by CCD scanning

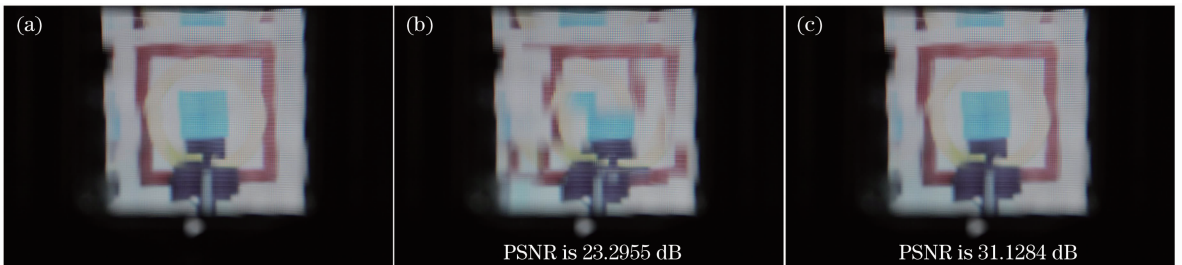


图 7 集成成像再现三维图像。(a)无误差再现三维图像; (b)存在误差再现三维图像; (c)校正后再再现三维图像  
Fig. 7 3D reconstruction integral image of (a) without distortion; (b) with random error; (c) after correction

## 5 结 论

针对三维集成成像与显示技术中采用相机阵列获取物体三维信息的系统,基于相机阵列的几何成像原理和图像处理方法,通过参考点位置坐标以及相机位置平移误差和旋转误差的计算,分析了相机阵列的位置平移误差和旋转误差与元素图像间的关系,以及校正算法的精度。模拟结果显示,该方法可实现对平移误差的完全校正。而旋转误差校正后,残留误差由图像阵列的中心到四周逐渐增大,但最大残差仍小于相机阵列最大拍摄视场角的 5%,说明该方法可以对存在旋转误差的元素图像进行有效的校正,满足集成成像的显示要求。光学实验结果表明,利用此种方法对相机阵列的位置误差校正后,

置误差校正后,用以表征再现三维图像质量的 PSNR 提高了 33.6%,说明所提出的校正方法能够有效地校正相机阵列的位置误差,满足三维再现对元素图像阵列的要求。但是需要说明的是,由于在校正算法中采用 8 邻域提取算法提取参考点的位置坐标,影响了位置坐标的提取精度,最终三维再现图像的 PSNR 计算结果为 31.1284 dB,如果采用更先进的参考点位置坐标提取算法,则会进一步提高校正算法的精度,并获得更好的三维再现效果。

用以表征再现三维图像质量的 PSNR 提高了 33.6%,明显优于校正前元素图像阵列的再现三维图像,消除了相机阵列位置偏差对元素图像阵列的影响,满足了集成成像的显示要求。这对于三维集成成像与显示技术的应用具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 J. H. Park, K. Hong, B. Lee. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(34): H77~H94
- 2 Wang Fang, Li Da, Zhao Xing *et al.*. Study on the stereo depth of integral imaging three-dimensional display system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s109002  
王 芳, 黎 达, 赵 星 等. 集成成像三维显示系统立体深度的研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s109002
- 3 Hao Jinbo, Hu Manli, Li Linsen *et al.*. Real-time three-dimensional object recognition with microlens array [J]. *Acta*

- Photonica Sinica, 2007, **36**(11): 2008~2012
- 郝劲波, 忽满利, 李林森等. 基于微透镜阵列的实时三维物体识别[J]. 光子学报, 2007, **36**(11): 2008~2012
- 4 M. Hain, B. Javidi, T. Tschudi *et al.*. 3D integral imaging using diffractive Fresnel lens arrays[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1): 315~326
- 5 Liao Jun, Wang Haidong, Ding Jianping *et al.*. Multiple image produced by micro-lens array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1): 52~54
- 廖军, 王海东, 丁剑平等. 利用微透镜阵列产生多重像[J]. 中国激光, 2001, **A28**(1): 52~54
- 6 Jin Hongzhen, Lou Yimin, Wang Hui *et al.*. Integral color hologram of virtual 3D object generated by integral photography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1304~1309
- 金洪震, 楼益民, 王辉等. 基于集成照相术制作虚拟三维物体彩色全息图的新方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1304~1309
- 7 Qionghua Wang, Huan Deng, Tiantian Jiao *et al.*. Imitating micro-lens array for integral imaging [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 512~514
- 8 Huan Deng, Qionghua Wang, Dahai Li *et al.*. Realization of undistorted and orthoscopic integral imaging without black zone in real and virtual fields[J]. *J. Display Technol.*, 2011, **7**(5): 255~258
- 9 Zhiliang Zhou, Yan Yuan, Xiangli Bin *et al.*. Enhanced reconstruction of partially occluded objects with occlusion removal in synthetic aperture integral imaging [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(4): 041002
- 10 Wang Hongxia, Wu Chunhong, Yang Yang *et al.*. Research and development of computer generated integral image[J]. *Computer Science*, 2008, **35**(6): 11~14
- 王红霞, 伍春洪, 杨扬等. 计算机生成三维全景图像研究现状与发展[J]. 计算科学, 2008, **35**(6): 11~14
- 11 Li Hui, Liu Kan, Zhang Xinyu *et al.*. 128 × 128 elements frequency driven liquid crystal lens array with tunable focal length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 218~223
- 李晖, 刘侃, 张新宇等. 128 × 128 元频率驱动变焦液晶透镜阵列[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 218~223
- 12 Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2869~2872
- 王伟, 周常河. 一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2869~2872
- 13 Jiang Xiaoping, Liu Desen. Fabrication of gradient refractive index hexagonal aperture planar microlens array based on spherical substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1792~1795
- 蒋小平, 刘德森. 变折射率球面六角形孔径平面微透镜阵列[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1792~1795
- 14 V. Vaish, B. Wilburn, N. Joshi *et al.*. Using plane+parallax for calibrating dense camera arrays[C]. *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004, **1**: 2~9
- 15 Y. Taguchi, T. Koike, K. Takahashi *et al.*. TransCAIP: A live 3D TV system using a camera array and an integral photography display with interactive control of viewing parameters[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, **15**(5): 841~852
- 16 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 17 M. Kawakita, H. Sasaki, J. Arai *et al.*. Geometric analysis of spatial distortion in projection-type integral imaging [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(7): 684~686
- 18 J. J. Lee, D. H. Shin, B. G. Lee. Simple correction method of distorted elemental images using surface markers on lenslet array for computational integral imaging reconstruction [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 18026~18037
- 19 Chen Yanping, Zhao Lei. Minutiae extraction in fingerprint images based on 8 neighborhoods region coding pursue pixel [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2008, **4**(4): 932~934
- 陈艳平, 赵磊. 基于8邻域编码逐像素跟踪法的指纹细节特征提取算法[J]. 电脑知识与技术, 2008, **4**(4): 932~934