

## 基于光场相机的曲面纹理展平算法研究

秦胜男<sup>1,2,3</sup>, 陆彦婷<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 对于分布在曲面物体表面的纹理图案, 为方便全面展示和后续使用, 常需要将其从曲面表面提取出来并展平。因此, 提出基于光场相机的曲面纹理展平方案, 利用聚焦型光场相机获得高分辨曲面纹理图像和无需额外配准的深度图, 并针对此方案设计曲面纹理展平算法。该算法将曲面纹理图像划分为多个有重叠的局部纹理图像, 基于拟合平面法向量对局部纹理失真进行校正, 最后将校正后的局部纹理图像拼接为完整的展平纹理图像。经仿真实验和真实实验验证, 所提曲面纹理展平算法可以有效展平不同曲面上分布的多种纹理, 并且在纹理图像质量差异和深度测量误差方面具备一定的鲁棒性。

**关键词** 纹理展平; 光场相机; 透视校正; 图像拼接

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230937

## Curved Texture Flattening Algorithm Based on the Light Field Camera

Qin Shengnan<sup>1,2,3</sup>, Lu Yanting<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;<sup>2</sup>CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, Jiangsu, China;<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** For texture patterns distributed on the curved surfaces of objects, it is often necessary to extract and flatten the texture patterns from the curved surfaces for the purpose of comprehensive display and subsequent usage. Therefore, we suggest a curved texture flattening scheme based on the light field camera, especially the focused light field camera, which can provide a high-resolution texture image and corresponding depth map without additional registrations. A curved texture flattening algorithm is designed for this scheme. The algorithm divides the curved texture image into multiple overlapping local texture images, corrects the local texture distortion based on the normal vector of the fitted plane for each local texture image, and finally stitches the corrected local texture images into a completely flattened texture image. Simulated and real experiments reveal that the proposed curved texture flattening algorithm can effectively flatten a variety of texture patterns distributed on different curved surfaces, and the algorithm has certain robustness on the different image quality of texture images and the errors of the depth measurements.

**Key words** texture flattening; light field camera; perspective projection; image mosaicing

## 1 引言

分布在曲面物体表面的纹理, 如文物表面绘制的图案<sup>[1-2]</sup>、曲面客体表面遗留的指纹<sup>[3]</sup>、人脸全景纹理<sup>[4]</sup>等, 为便于后续研究和使用的, 常需要将其从曲面表面提

取出来并展平, 获得对应的展平纹理图像。由于曲面表面存在深度差, 透视失真是曲面物体成像时必然的现象。直接拍摄得到的曲面纹理图像随深度变化具有不同程度的透视畸变, 会影响纹理细节的展现, 是纹理展平过程中需要解决的问题。

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-04-23; 录用日期: 2023-05-15; 网络首发日期: 2023-05-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11873069)

通信作者: \*ytlu@niao.ac.cn

目前,曲面纹理展平方法分为基于图像展平和与深度探测配合展平两类。基于图像的纹理展平,利用曲面物体的几何特性,从图像中提取相应的几何特征,由此推演曲面的三维结构,进而根据三维结构估计透视失真进行校正。这类技术通常适合对分布在特殊曲面的纹理进行展平,如柱面<sup>[5]</sup>和回旋曲面<sup>[6]</sup>等,因为此类曲面仅需少量几何特征与约束即可重建曲面结构。另一类纹理展平技术,在拍摄纹理图像的同时,利用深度探测设备获取拍摄对象的深度信息,用于纹理失真校正。如 Meng 等<sup>[7]</sup>利用结构光方法获取扭曲文档的三维信息,由三维信息对畸变图像进行校正,还原扭曲文档的内容。Lee 等<sup>[8]</sup>利用 RGB-D 相机建立拍摄对象的低分辨率几何结构和高分辨率纹理的对应关系,进行高质量的纹理获取。相对于仅由图像中的几何特征估计曲面三维信息的展平方法,基于深度探测设备提供的拍摄对象三维信息的展平方法展平的图像更为准确,但需要额外的操作将纹理图像与深度图进行配准。失真纹理校正方法也分为两类,第一类方法根据曲面三维信息估计基于相机旋转的校正投影映射<sup>[5,8]</sup>,或根据曲面几何特性计算相应的透视校正投影映射<sup>[6]</sup>,然后按照所得映射计算校正纹理图像。对于校正投影映射的投影作用范围,现有方法的整张图像使用同一个校正映射<sup>[5]</sup>,此时只有部分区域的校正是合适的,需要进行多角度拍摄,校正后选取每幅校正图像的合适区域进行拼接,或者将图像进行网格划分后按局部<sup>[8]</sup>进行校正。第二类方法依据曲面几何约束直接优化计算展平后像素的位置<sup>[7]</sup>来进行失真纹理校正,可用于任意曲面的纹理展平。

近年来,基于光场相机的计算成像技术发展迅速<sup>[9-12]</sup>。与普通相机相比,光场相机在主镜头和图像传感器之间加入一个微透镜阵列<sup>[13]</sup>,可以同时采集光线的强度和方向信息,进而反演拍摄场景的深度<sup>[14-15]</sup>。

传统光场相机存在最终成像分辨率低的问题,限制了其广泛应用。聚焦型光场相机<sup>[16-17]</sup>,通过改变微透镜阵列的位置,将最终成像分辨率大大提高,并能在相似相机配置条件下实现更高的深度计算精度,已被成功应用于多种工业检测场景。聚焦型光场相机在光学结构上可等效为多目相机,与双目相机<sup>[18-19]</sup>和相机阵列<sup>[20]</sup>相比,具有体积小、便于携带的优势。

鉴于聚焦型光场相机可直接获得拍摄对象的高分辨率图像和深度信息,且无需对纹理图像和深度图进行配准,适合作为曲面纹理的拍摄设备。针对基于聚焦型光场相机的曲面纹理提取解决方案,本文提出一套曲面纹理展平算法。该算法基于曲面深度信息利用聚类算法对曲面进行划分,然后分区域进行相同尺度局部纹理图像透视失真校正,最后将校正后的局部纹理图像拼接成一幅展平的纹理图像。经仿真和实际实验验证,该算法可将分布在表面上的纹理图像成功展平。最后通过多组仿真实验,分别探讨曲面弯曲程度、图像质量、深度测量误差对曲面纹理展平算法的影响。

## 2 算法原理

曲面可近似认为由若干个小平面组成,基于此,将局部曲面视作平面,并由平面法向量计算校正映射,对局部纹理进行失真校正,即可实现整个曲面的纹理展平。算法过程如图 1 所示,将聚焦型光场相机得到的曲面纹理图像和对应深度图作为算法输入,第一步将曲面划分为互相有重叠的若干区域;第二步对各区域进行平面拟合,基于拟合平面法向量,将各区域透视畸变纹理图像校正为正视视角下的相同尺度的纹理图像;第三步将校正后的局部纹理图像拼接为完整的纹理图像。

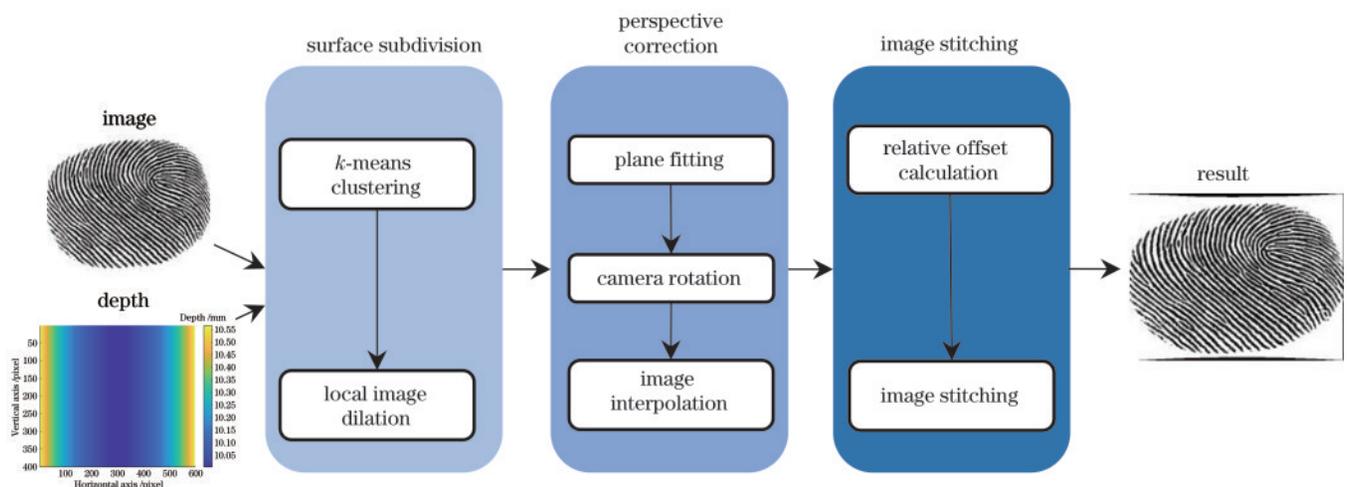


图 1 曲面纹理展平算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the curved texture flattening algorithm

### 2.1 曲面分割

由光场相机捕获的深度图即可得到拍摄曲面各点

的三维信息,根据曲面各点三维数据的分布情况对曲面进行划分。使用  $k$ -means 聚类算法<sup>[21-23]</sup>对曲面三维

数据点进行划分,将曲面分割为数量为  $k$  的互相不重叠的小曲面。该算法对曲面结构没有先验要求,为便于算法第三步图像拼接的实施,利用形态学膨胀运算,对各小曲面对应的局部纹理图像实施膨胀,使相邻的局部纹理图像互有重叠,重叠程度由膨胀算子半径控制。

聚类个数  $k$  的选取影响曲面分割所得小曲面的大小。展平算法将小曲面视作小平面进行透视失真校正,小曲面区域过大会导致校正误差增大;区域过小、小区域数量较多,会增加算法第三步拼接误差累积的可能性。基于多个小平面对曲面的拟合误差,设计了一个聚类评价指标,用于聚类个数  $k$  的选取。对于聚类个数为  $k$  的聚类结果,首先对各膨胀后图像对应的小曲面进行平面拟合,然后计算曲面各点拟合均方根误差,最后将拟合均方根误差与曲面深度差的比值作为聚类评价指标,其公式为

$$E(k) = \frac{1}{|\Delta z|} \sqrt{\left( \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{m_i} d_{ij}^2 \right) / \left( k \sum_{i=1}^k m_i \right)}, \quad (1)$$

式中:  $k$  为聚类个数,即曲面分割数量;  $\Delta z$  为整个曲面的深度差;  $m_i$  为第  $i$  块小曲面的数据点数;  $d_{ij}$  为第  $i$  块小曲面的第  $j$  个数据点到对应拟合平面的距离。该评价指标综合考虑曲面拟合误差和曲面深度差两方面因素。曲面拟合误差通常随聚类个数  $k$  增大而减小,可用于显示不同聚类个数对应的聚类效果。将拟合均方根误差除以曲面深度作为评价指标,使得在相同评价指标值情况下,深度范围大的曲面对应的曲面拟合误差更大。实际使用时,可从数据点中均匀抽样部分数据,进行一系列  $k$  值的预聚类,并计算相应的聚类评价指标值,构成聚类评价曲线。可以采用手肘法<sup>[23]</sup>选取评价指标值曲线拐点对应的  $k$  值作为聚类个数,也可依据经验设定一个评价指标阈值用于聚类个数的选取。

## 2.2 局部纹理校正

曲面分割将整幅曲面纹理图像分割为数量为  $k$  的小区域  $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k\}$ , 在局部纹理校正这步,首先采用最小二乘法对每块区域进行平面拟合,并计算各拟合平面的法向量集合  $\mathbf{n} = \{\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k\}$ , 然后基于拟合平面法向量对每块区域对应的局部纹理图像进行相同尺度的透视失真校正。

局部纹理失真校正原理如图 2 所示,光场相机在视角 1 对曲面  $S$  进行拍摄,相机中心为  $C$ ,光场相机坐标系与世界坐标系重合。不考虑透镜成像带来的畸变问题,以针孔成像模型简化成像过程,像平面设置在平面 1 处。曲面上小区域  $\pi_i$  受到所处曲面深度影响,在平面 1 上成像时发生透视畸变和尺度改变。对该区域进行纹理校正,则需要将其在成像平面 1 上所成的像校正为其正视角(即图 2 中视角 2)下所成的像,并且需要将各区域校正后的纹理尺度调整至统一。

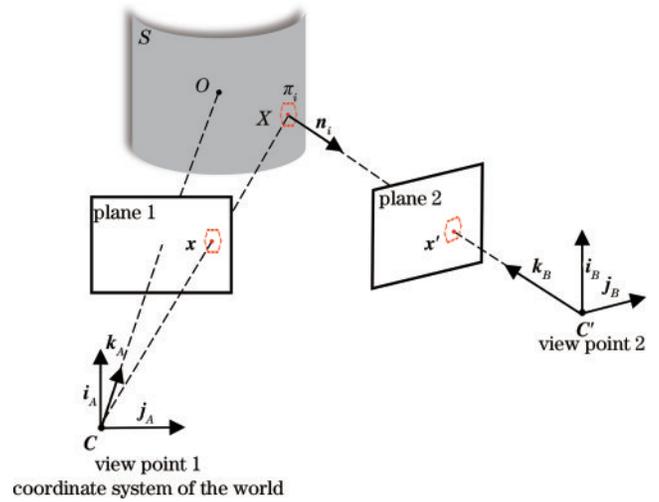


图 2 局部纹理失真校正原理示意图

Fig. 2 Schematic of local texture distortion correction

如图 2 所示,小曲面  $\pi_i$  的拟合平面法向量  $\mathbf{n}_i$  所指示的方向即为其正视角方向,对该区域纹理进行透视校正,即按照此方向进行相机坐标系旋转,计算相机旋转后对应的像。根据针孔相机成像模型<sup>[24]</sup>,区域  $\pi_i$  上一物点  $X$  在原成像平面 plane 1 上的像  $\mathbf{x}$ , 经过相机坐标系旋转后的像  $\mathbf{x}'$  表示为

$$\mathbf{x}' = \mathbf{K} \mathbf{R} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{K}$  为相机内参矩阵;  $\mathbf{R}$  为相机坐标系旋转矩阵。设相机原坐标系为  $(\mathbf{i}_A, \mathbf{j}_A, \mathbf{k}_A)$ 、旋转后相机坐标系为  $(\mathbf{i}_B, \mathbf{j}_B, \mathbf{k}_B)$ 、 $\mathbf{n}_i$  为小曲面  $\pi_i$  的拟合平面法向量,有

$$\begin{cases} \mathbf{i}_B = \mathbf{i}_A - (\mathbf{i}_A \cdot \mathbf{k}_B) \cdot \mathbf{k}_B \\ \mathbf{j}_B = \mathbf{k}_B \times \mathbf{i}_B \\ \mathbf{k}_B = \mathbf{n}_i / |\mathbf{n}_i| \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $\cdot$  表示向量点积;  $\times$  表示向量叉积。旋转矩阵  $\mathbf{R}$  为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_A \cdot \mathbf{i}_B & \mathbf{j}_A \cdot \mathbf{i}_B & \mathbf{k}_A \cdot \mathbf{i}_B \\ \mathbf{i}_A \cdot \mathbf{j}_B & \mathbf{j}_A \cdot \mathbf{j}_B & \mathbf{k}_A \cdot \mathbf{j}_B \\ \mathbf{i}_A \cdot \mathbf{k}_B & \mathbf{j}_A \cdot \mathbf{k}_B & \mathbf{k}_A \cdot \mathbf{k}_B \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由于各小区域分别进行校正,无需考虑相机中心平移问题,图 2 中旋转前后的相机中心  $C$  和  $C'$  实际是重合的。为便于后续的拼接,各区域校正后纹理图像的尺度需调整至统一,将  $\mathbf{x}'$  在转为非齐次坐标时统一除以相同的尺度因子即可,相同尺度因子意味着旋转后的相机到各小区域的距离相同。

上述校正和尺度调整后获得的局部校正纹理图像的坐标点分布非均匀,局部纹理校正的最后步骤是对坐标非均匀分布的校正纹理图像进行均匀网格插值。

## 2.3 图像拼接

图像拼接技术研究已较为成熟,其按配准方式主要分为基于区域的拼接方法和基于特征的拼接方法两大类<sup>[25]</sup>。当待拼接图像之间存在旋转和尺度差异时,基于特征的拼接方法具有良好的鲁棒性;当待拼接图

像之间仅存在平移关系,并且具有足够的重叠区域时,基于区域的拼接方法具有良好的准确性。

曲面分割和局部纹理校正后,各局部纹理图像已被校正为等尺度的正视角下的局部纹理图像,相邻局部纹理图像之间仅存在平移关系,并具有一定的重叠区域。因此,采用基于区域的拼接方法,使用归一化互相关(NCC)算法<sup>[26]</sup>计算已拼接图像和校正后的下一块待拼接局部纹理图像之间的偏移量,然后根据偏移量将各局部纹理图像依次拼接为一幅展平的整体纹理图像。NCC计算公式为

$$V_{NCC}(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x - u, y - v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2 [t(x - u, y - v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0.5}}, \quad (5)$$

式中: $f$ 为已拼接图像; $t$ 为下一块待拼接局部纹理图像; $t(x - u, y - v)$ 为图像 $t$ 相对图像 $f$ 平移 $(u, v)$ 后的图像; $\bar{t}$ 为图像 $t$ 的灰度均值; $\bar{f}_{u,v}$ 为图像 $f$ 上平移 $(u, v)$ 后的图像 $t$ 所覆盖区域的灰度均值。计算不同平移量 $(u, v)$ 对应的NCC值构成NCC矩阵,矩阵值最大元素

对应的平移量即为图像 $f$ 和 $t$ 的相对偏移量。

### 3 实验与验证

#### 3.1 数值仿真

##### 3.1.1 仿真设置

为验证曲面纹理展平算法的有效性,基于针孔成像模型仿真光场相机输出的曲面纹理图像和对应深度图,进行一系列纹理展平实验。仿真参数设置如下:构造半径为2.5 mm、高为2 mm的圆柱体,将世界坐标系原点安放在相机中心,相机光轴与圆柱体柱面中心相交,为简单起见,设置相同的像距与物距,均为10 mm,进行放大率为1的成像,图像传感器采样数为401 pixel×601 pixel,像素大小为5 μm。因圆柱只有一个方向有曲率,可精确模拟纹理贴在柱面上的针孔成像效果。将贴于柱面的指纹、图案和文字纹理作为实验对象,按上述参数模拟光场相机分别对其拍摄输出纹理图像和深度图。图3为文字纹理的模拟纹理图像和深度图,选择文字图像作为实验对象是因其纹理较为密集且展平结果直观便于观察。

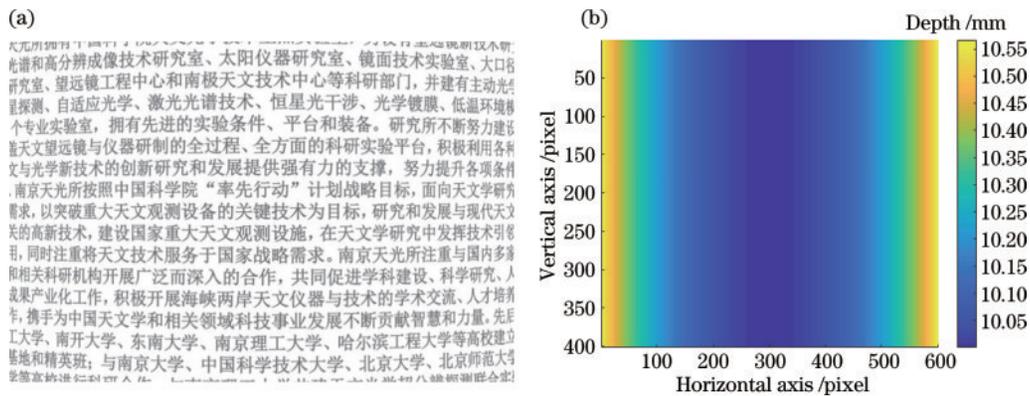


图3 曲面文字纹理的光场相机输出仿真。(a) 纹理图像;(b) 深度图

Fig. 3 Simulated output of light field camera for the curved characters texture. (a) Texture image; (b) depth map

##### 3.1.2 仿真实验结果

首先利用曲面纹理展平算法对图3中柱面文字纹

理进行展平。图4(a)为聚类个数以20为间隔,从20至200对应的聚类评价指标值 $E(k)$ 。以0.01为阈值,

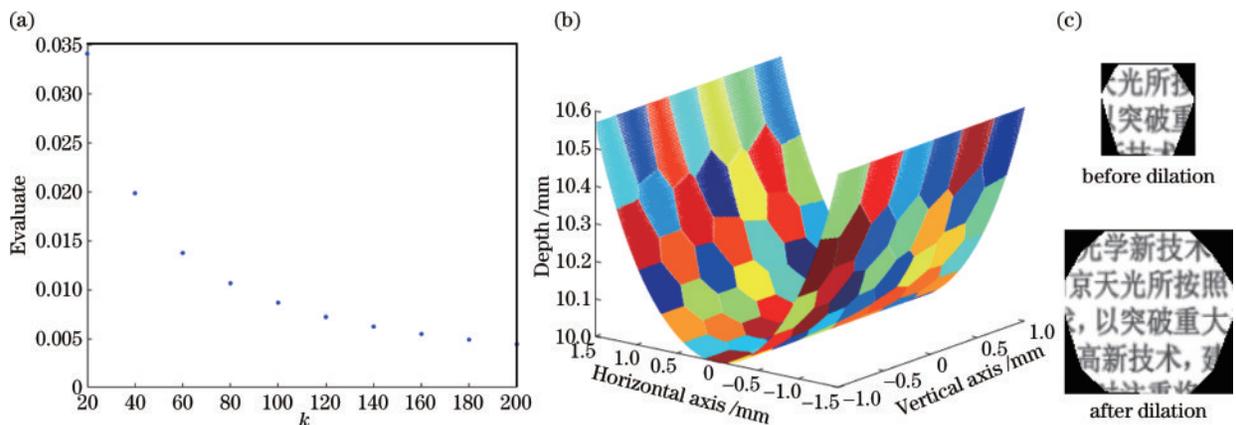


图4 曲面分割。(a) 聚类评价指标值;(b) 聚类结果;(c) 局部纹理膨胀前后图像

Fig. 4 Surface segmentation. (a) Cluster evaluation value; (b) cluster result; (c) local texture images before and after dilation

选择 80 为聚类个数, 聚类结果如图 4(b) 所示。图 4(c) 上图为聚类结果中的一类对应区域的局部纹理图像, 图 4(c) 下图为该区域膨胀后的纹理图像。图 5(a)~(d) 为 4 个相邻小曲面校正前的纹理图像, 图 5(e)~(h) 为对应的校正结果, 从图 5 中可见, 校正前略微倾斜的文字, 经校正后变得水平, 并且校正后各区域纹理

尺度统一。图 6(a) 为图 5 中 4 个相邻小曲面的校正后纹理拼接过程, 图 6(b) 为整个曲面纹理最后的拼接结果。将图 6(b) 与图 3(a) 比较, 可以明显看出, 因曲面深度差异造成的文字弯曲和文字近大远小的现象, 经算法展平后已基本消除, 图 6(b) 中文字排列水平且大小一致。

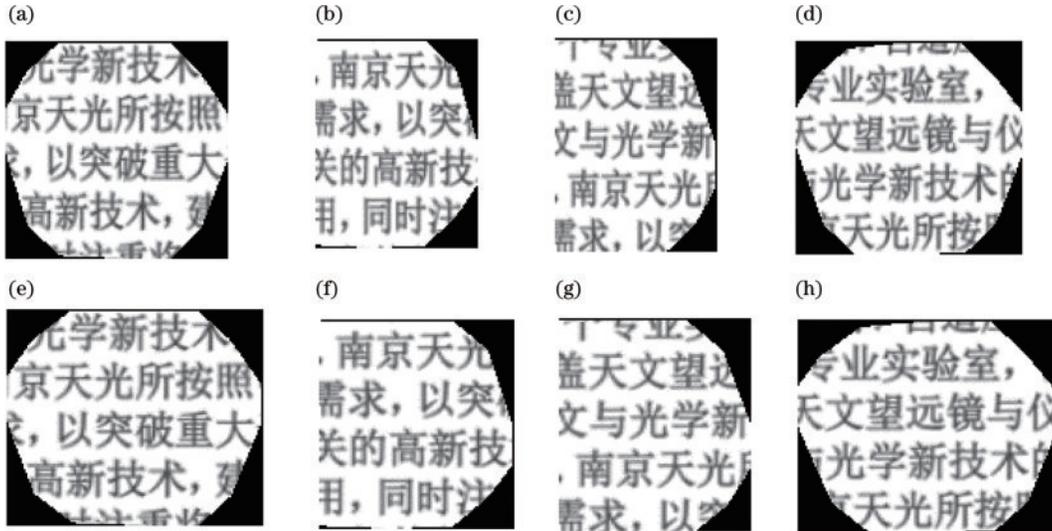


图 5 局部纹理校正结果。(a)~(d) 校正前局部纹理; (e)~(h) 校正后局部纹理

Fig. 5 Correction results of local textures. (a)~(d) Local textures before correction; (e)~(h) local textures after correction

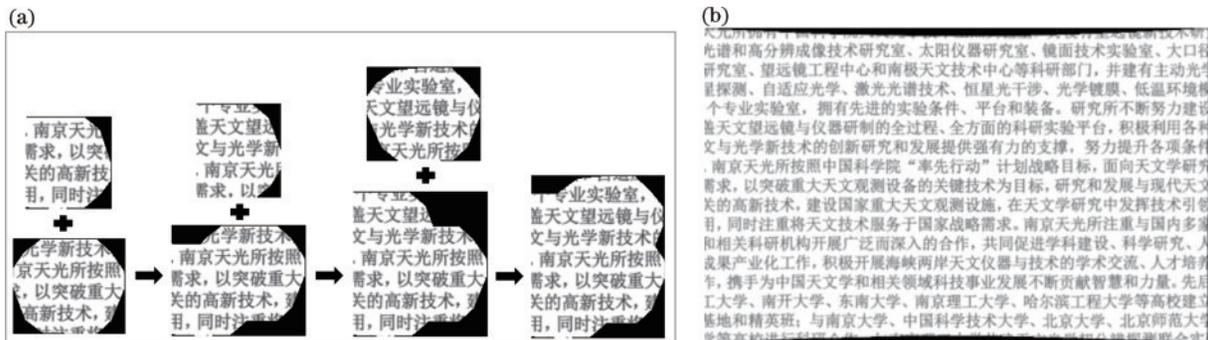


图 6 图像拼接。(a) 图 5 中局部纹理的拼接; (b) 整个曲面纹理的展平结果

Fig. 6 Image stitching. (a) Stitching of the local texture images in Fig. 5; (b) texture flattening result of the whole curved surface

随后对仿真柱面指纹、瓷器和壁画图案分别进行展平实验。图 7(a)~(c) 分别为指纹、瓷器和壁画图案的纹理原图, 图 7(d)~(f) 为模拟光场相机拍摄的透视畸变图像, 其展平结果如图 7(g)~(i) 所示, 由展平结果可知, 算法对不同类型的纹理均有良好的展平效果。

### 3.2 基于聚焦型光场相机的纹理展平实验

利用国内厂商生产的聚焦型光场相机对曲面纹理进行拍摄, 将光场相机配套软件计算出的纹理图像和深度图输入曲面纹理展平算法, 验证算法性能。将约  $22.5 \text{ mm} \times 17.0 \text{ mm}$  的指纹图像打印在纸上, 然后将其贴在圆柱体表面模拟曲面纹理对象, 使用光场相机对曲面指纹进行拍摄, 图 8(a)~(b) 为光场相机软件计算出的指纹图像和深度图, 如图 8(b) 所示, 指纹在曲

面上对应的深度差约为  $4.87 \text{ mm}$ 。所提算法对该曲面指纹的展平结果如图 8(c) 所示, 观察展平后的指纹图像, 其水平方向较展平前纹理图像有明显展平效果, 验证了所提算法的有效性。

## 4 分析与讨论

为全面考察纹理展平算法的性能, 从曲面弯曲程度、纹理图像质量和光场相机深度测量误差三个角度, 讨论这些因素对展平算法的影响。鉴于文字纹理展平结果的直观性, 统一使用文字纹理作为实验对象。为量化评价展平结果, 将式(5)定义的 NCC 作为相似性度量, 评价展平结果与原始纹理的相关度。首先计算展平结果图像和参考图像的 NCC 矩阵, 然后选取矩阵元素的最大值  $V_{\text{NCC}, \text{max}}$  作为展平结果评价, 该值越接

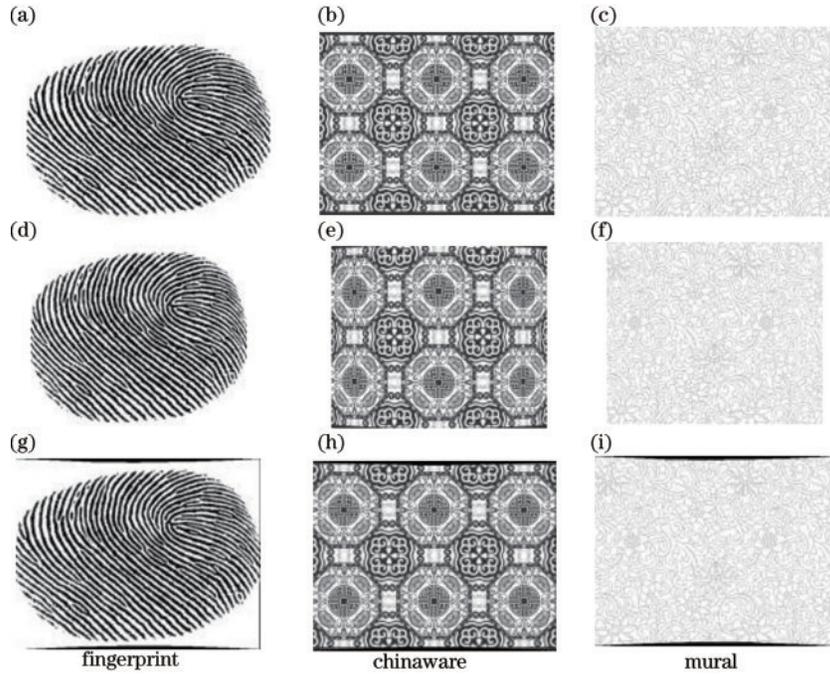


图 7 不同纹理图案展平效果。(a)~(c) 指纹、瓷器 and 壁画图案纹理原图;(d)~(f) 指纹、瓷器 and 壁画图案曲面纹理;(g)~(i) 指纹、瓷器 and 壁画图案曲面纹理展平结果

Fig. 7 Flattening results of different texture images. (a)~(c) Original texture images of fingerprint, chinaware and mural; (d)~(f) texture images of fingerprint, chinaware and mural on curved surface; (g)~(i) flattening results of curved fingerprint, chinaware and mural

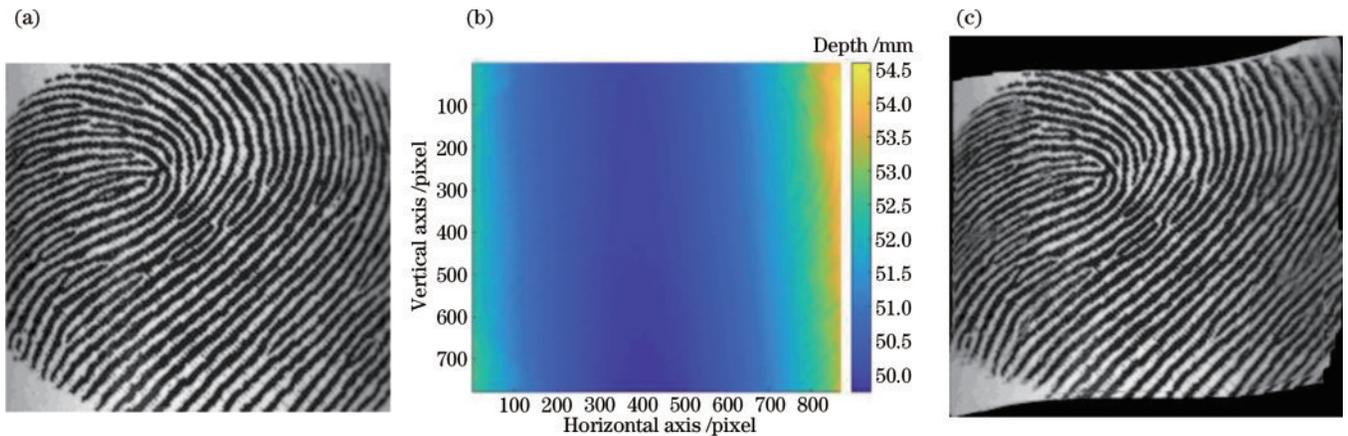


图 8 基于聚焦型光场相机的纹理展平实验。(a) 光场相机输出的曲面指纹;(b) 光场相机输出的深度图;(c) 曲面指纹展平结果

Fig. 8 Texture flattening experiment based on the focused light field camera. (a) Curved finger image output by light field camera; (b) depth map output by light field camera; (c) flattening result of the curved finger image

近于 1,表明纹理展平效果越好。

#### 4.1 曲面弯曲程度

为检验纹理展平算法对不同曲率曲面纹理的展平效果,对贴于半径分别为 2.0,2.5,3.0 mm 的柱面上的曲面文字纹理进行仿真,其余参数设置不变,图 9(a)~(c)分别为半径 2.0,2.5,3.0 mm 柱面上的曲面文字纹理图像。以 0.01 为阈值选取曲面划分个数,使用曲面纹理展平算法分别对曲面进行划分、局部纹理校正和拼接,图 9(d)~(f)为对应的展平结果。如图 9(d)~(f)所示,对不同弯曲程度曲面上的纹理,纹理展平算法均能顺利将其展平。以所贴纹理原始图像为参考,计算出的展平结果评价价值  $V_{NCC,max}$  分别为

0.826、0.866 和 0.825,均接近于 1,表明纹理展平算法对不同弯曲程度的曲面的纹理展平效果良好。

#### 4.2 纹理图像质量

纹理展平算法中的图像拼接需要计算局部纹理图像之间的相对偏移,此步骤易受图像质量影响,通过对不同对比度的含噪曲面纹理图像进行展平实验,考察图像质量对纹理展平算法性能的影响。曲面仿真参数不变,通过调整图像 Gamma 曲线调整图像对比度,同时给不同对比度的图像统一加入均值为 0、标准差为 0.1 mm 的高斯噪声。以 0.1 间隔在对比度 0.2~0.9 区间内生成不同对比度的含噪纹理图像,对其分别进行展平实验。图 10(a)~(d)、10(e)~(h)分别为为对比

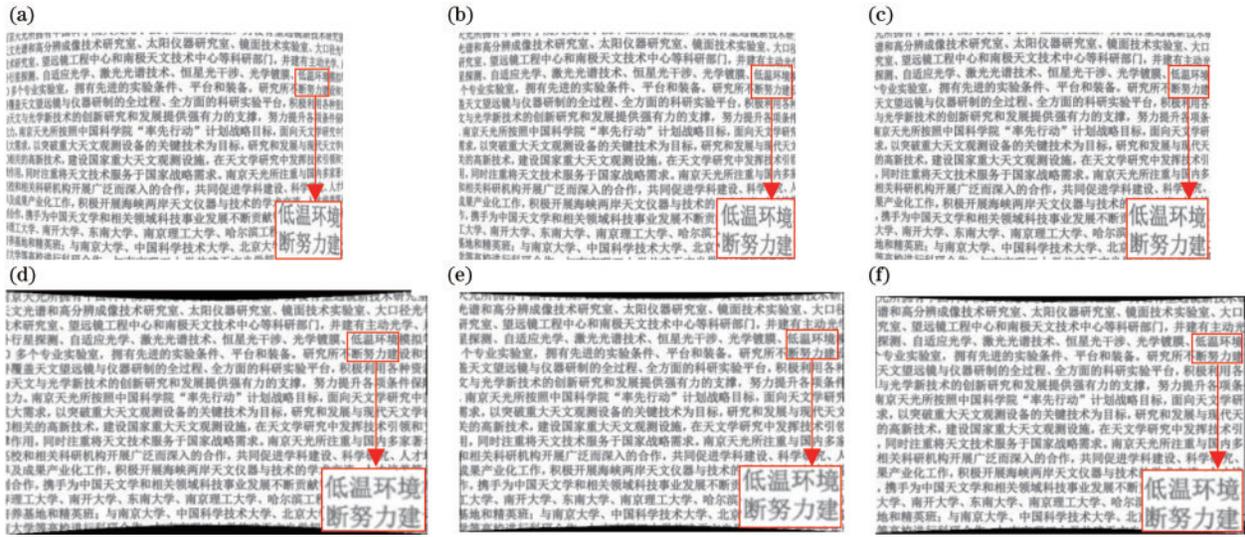


图 9 不同弯曲程度曲面上纹理的展平结果(右下角为矩形框区域放大图)。(a)~(c) 不同弯曲程度的曲面纹理图像;(d)~(f) 对应的纹理展平结果

Fig. 9 Flattening results for textures on surface with different degrees of bending (the image at the lower-right corner is a close-up of the region labeled by rectangular box). (a)~(c) Texture images on curved surface with different degrees of bending; (d)~(f) corresponding texture flattening results

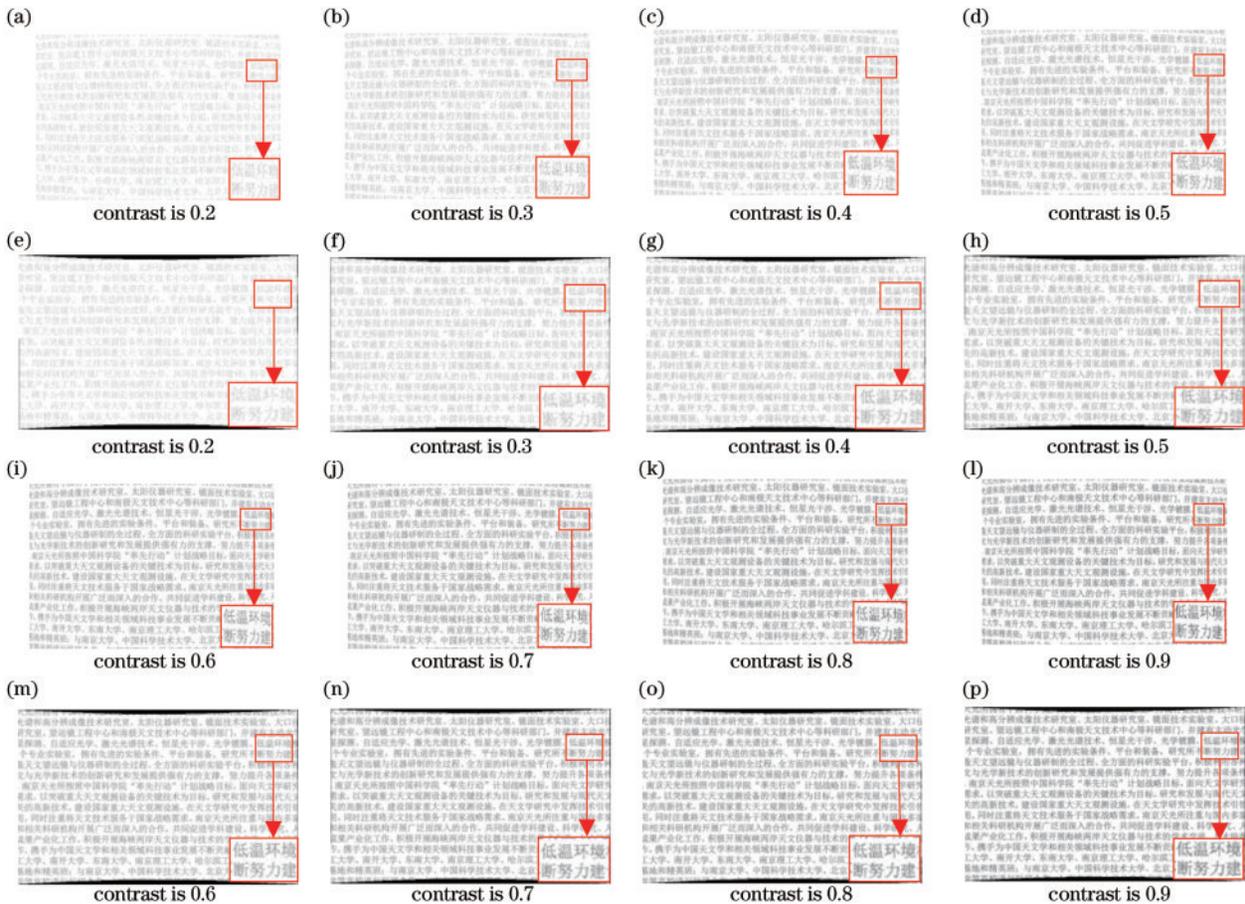


图 10 不同对比度含噪曲面纹理展平结果(右下角小图为矩形框区域局部放大图)。(a)~(d) 对比度为 0.2~0.5 的曲面纹理图像;(e)~(h) 对应的纹理展平结果(对比度为 0.2~0.5);(i)~(l) 对比度为 0.6~0.9 的曲面纹理图像;(m)~(p) 对应的纹理展平结果(对比度为 0.6~0.9)

Fig. 10 Flattening results of noisy texture images with different contrasts (the image at lower-right corner is a close-up of the region labeled by the rectangular box). (a)~(d) Curved texture images with 0.2~0.5 contrasts; (e)~(h) corresponding texture flattening results (contrasts of 0.2~0.5); (i)~(l) curved texture images with 0.6~0.9 contrasts; (m)~(p) corresponding texture flattening results (contrasts of 0.6~0.9)

度为 0.2~0.5 的含噪曲面纹理图像及其对应的展平结果,图 10(i)~(l)、10(m)~(p)分别为对比度为 0.6~0.9 的含噪曲面纹理图像及其对应的展平结果。将对对比度含噪声原始纹理图像作为参考,计算图 10(e)~(h)、10(m)~(p)中展平结果对应的展平评价指标值  $V_{NCC,max}$ ,结果如表 1 所示。

表 1 不同对比度含噪曲面纹理展平结果量化评价指标值  
Table 1 Quantitative evaluation values of flattening results of noisy texture images with different contrasts

Image contrast	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$V_{NCC,max}$	0.729	0.732	0.810	0.833	0.850	0.857	0.864	0.900

由图 10 和表 1 可知,曲面纹理展平算法对比度较差的曲面图像也可以被有效展平,展平效果随图像对比度的提高而提升。

### 4.3 深度误差

曲面纹理展平算法基于曲面局部拟合法向量进行纹理失真校正。当光场相机对曲面深度测量存在误差时,势必会影响拟合平面法向量的估计,进而影响局部

纹理校正效果。因此,首先通过两组仿真实验探讨光场相机深度测量误差对局部纹理校正的影响,然后分析深度误差对纹理展平算法的影响。

#### 1) 不同程度深度误差对局部纹理校正的影响

模拟场景对应的柱面深度差为 0.557 mm,对于该曲面右上角的一小块区域[图 11(a)中矩形框],在其深度数据上分别叠加均值为 0、标准差  $\sigma$  为 0.001, 0.003, 0.005, 0.007 mm 的高斯噪声,模拟不同程度的光场相机深度测量误差。这 4 种深度噪声分别对应整个曲面深度范围的 0.2%、0.5%、0.9% 和 1.3%。然后分别在含噪深度数据上进行平面拟合和局部纹理失真校正实验。图 11(b)~(e)是叠加标准差为 0.001, 0.003, 0.005, 0.007 mm 高斯噪声后的纹理失真校正结果。以无噪声时该区域纹理校正结果为参考,计算出的不同深度噪声下纹理校正结果的  $V_{NCC,max}$  分别为 0.975、0.968、0.942 和 0.882。由图 11(b)~(d)及对应的  $V_{NCC,max}$  可知,随着深度误差的增加,局部纹理的校正效果也随之降低。如图 11(e)所示,当所加的深度噪声标准差相对于整个曲面深度差超过 1% 时,该区域的展平结果出现模糊现象。

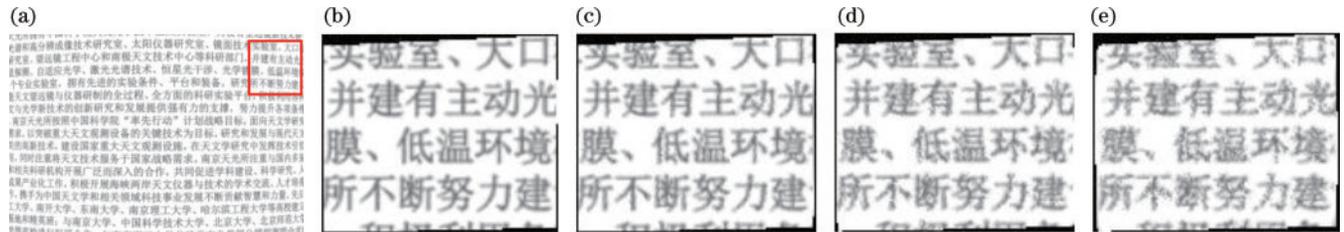


图 11 同一区域叠加不同深度噪声时的局部曲面纹理失真校正结果。(a)纹理图像(右上角矩形框区域为待校正区域);(b) $\sigma=0.001$  mm;(c) $\sigma=0.003$  mm;(d) $\sigma=0.005$  mm;(e) $\sigma=0.007$  mm

Fig. 11 Perspective correction results of the local texture images with depth noise of different standard deviations. (a) Texture image (the region labeled with rectangular box is the region to be corrected); (b)  $\sigma=0.001$  mm; (c)  $\sigma=0.003$  mm; (d)  $\sigma=0.005$  mm; (e)  $\sigma=0.007$  mm

#### 2) 深度误差对不同法向量角度局部纹理校正的影响

在模拟的曲面文字纹理上选取 5 个具有不同法向量角度的区域,记为区域 a~e,选取范围如图 12(a)中矩形框所示,图 12(b)为给图 12(a)柱面文字纹理的深度数据加上均值为 0、标准差为 0.005 mm 的高斯噪声后的曲面纹理展平结果,对比图 12(b)与图 6(b)可以发现,存在深度误差时,柱面中心区域的展平效果与无深度噪声时的展平效果非常接近,接近柱面边缘的区域纹理展平效果则略有降低,即整幅图像的纹理展平结果受深度噪声影响的规律与局部纹理受深度噪声影响的规律相同。以所贴纹理原始图像为参考,计算出图 6(b)的  $V_{NCC,max}$  为 0.866,图 12(b)的  $V_{NCC,max}$  为 0.844,展平效果量化评价指标值也略有下降。

图 13(a)~(e)为选取区域对应的校正前局部纹理图像。无深度误差时,这 5 个小曲面拟合平面法向量与光轴的夹角  $\theta$  如表 2 第 2 行所示, $\theta$  从 0 逐渐变化到

32.766°。无深度噪声时的局部纹理校正结果如图 13(f)~(j)所示,可见不同法向量角度的局部纹理均得到了良好的校正。给这 5 个区域对应的深度数据叠加均值为 0、标准差为 0.005 mm 的高斯噪声,该高斯噪声强度对应整个曲面深度范围的 0.9%,5 个含噪小曲面拟合平面法向量与光轴的夹角  $\theta'$  如表 2 第 3 行所示, $\theta'$  与  $\theta$  之间的绝对误差(AE)如表 2 第 4 行所示,可见,引入相同程度的深度噪声后,不同法向量角度小曲面的平面法向量拟合误差较为接近。图 13(k)~(o)为叠加深度噪声后各区域的局部纹理校正结果,以对应的无噪声局部纹理校正结果为参考,表 2 第 5 行给出了含深度噪声局部纹理校正结果的  $V_{NCC,max}$ 。由校正结果图和  $V_{NCC,max}$  评价指标值可知,深度噪声对不同法向量角度局部纹理图像校正的影响不同,随着曲面法向量与光轴夹角的增大,深度噪声对纹理校正效果的影响也在增大。

由上述两组实验可知,光场相机深度测量误差对

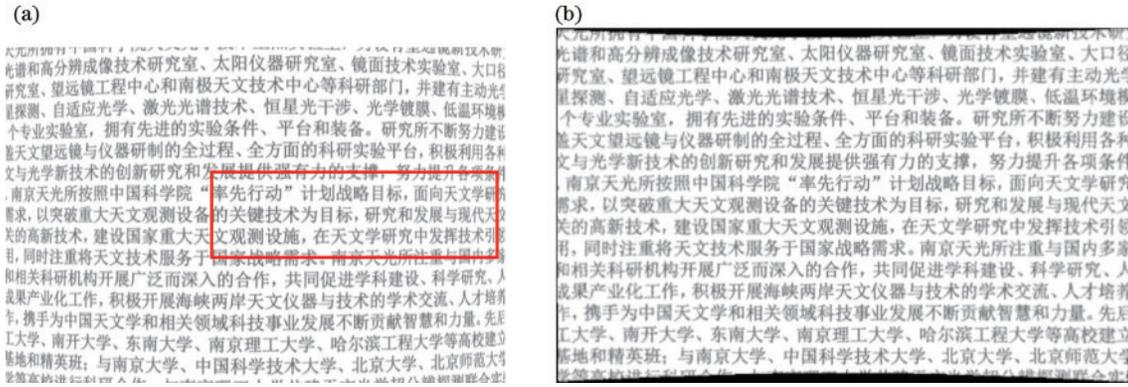


图 12 纹理图像及其深度叠加 0.005 mm 高斯噪声后的展平结果。(a) 纹理图像(方框为局部纹理选取范围);(b) 纹理展平结果  
 Fig. 12 Texture image and its flattening result when its depth map is superimposed with 0.005 mm Gaussian noises. (a) Texture image (the region labeled with rectangular box is the local texture selection range); (b) flattening result



图 13 不同角度法向量局部纹理图像失真校正结果。(a)~(e) 校正前局部纹理图像;(f)~(j) 无深度噪声时的校正后局部纹理图像;(k)~(o) 叠加相同深度噪声后的校正后局部纹理图像  
 Fig. 13 Correction results of local texture images with different normal vectors. (a)~(e) Local textures to be corrected; (f)~(j) correction results of local texture images without depth noise; (k)~(o) correction results of local texture images with depth noise of the same standard deviation

表 2 深度噪声对不同角度法向量局部曲面纹理图像校正的影响  
 Table 2 Influences of the depth noise on correction of local texture images with different normal vectors

Area	a	b	c	d	e
$\theta / (^\circ)$	0	6.992	14.410	22.767	32.766
$\theta' / (^\circ)$	0.015	6.978	14.422	22.794	32.794
AE / (°)	0.015	0.014	0.012	0.027	0.028
$V_{NCC, \max}$	0.986	0.957	0.954	0.949	0.932

纹理展平算法的效果有影响,深度测量误差越大,对展平算法的影响也越大;不同法向量角度的局部纹理展平受深度测量误差的影响也不同,大角度法向量局部纹理的展平对深度测量噪声更为敏感。叠加 0.005 mm 标准差高斯深度噪声的整个曲面纹理展平结果表明,所提纹理展平算法对景深范围 1% 以内的深度误差具备一定的鲁棒性。实际应用时,应尽量选择景深合适并且深度测量误差小的光场相机。

## 5 结 论

针对曲面纹理展平问题,提出基于聚焦型光场相机的纹理展平方案,并设计了一套曲面纹理展平算法。该算法以光场相机获得的纹理图像及对应的深度信息为输入,通过曲面分割、局部纹理校正和图像拼接三步,得到展平后的纹理图像。一系列仿真实验表明,所提算法可以对不同类型纹理、不同弯曲程度曲面上纹理、不同图像质量纹理进行展平,但曲面深度测量误差对展平效果会有一定影响。实际光场相机曲面纹理展平实验进一步验证了算法的有效性。对于文物表面图案提取和刑侦指纹提取等特定场景,选取合适视场和景深的光场相机,采取合适的照明,所提算法可以得到良好的展平纹理,满足相应场景纹理提取的需求。

### 参 考 文 献

- [1] Ramm R, Heinze M, Kühmstedt P, et al. Portable solution for high-resolution 3D and color texture on-site digitization of cultural heritage objects[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2022, 53: 165-175.
- [2] 屠大维, 兰浩, 张曦. 文物数字化三维重建技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 191504.  
Tu D W, Lan H, Zhang X. Digital three-dimensional reconstruction technology of cultural relics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 191504.
- [3] 刘兴军, 陆彦婷. 基于计算光场成像的曲面客体表面指纹提取[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811024.  
Liu X J, Lu Y T. Extracting fingerprints from surface of curved objects using computational light-field imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811024.
- [4] Yang F. Development of a fast panoramic face mosaicking and recognition system[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(8): 087005.
- [5] Puech W, Borş A G, Pitas I, et al. Projection distortion analysis for flattened image mosaicing from straight uniform generalized cylinders[J]. *Pattern Recognition*, 2001, 34(8): 1657-1670.
- [6] Colombo C, Del Bimbo A, Pernici F. Metric 3D reconstruction and texture acquisition of surfaces of revolution from a single uncalibrated view[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(1): 99-114.
- [7] Meng G F, Wang Y, Qu S Q, et al. Active flattening of curved document images via two structured beams[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 3890-3897.
- [8] Lee J H, Ha H, Dong Y, et al. Texture Fusion: high-quality texture acquisition for real-time RGB-D scanning [C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 13-19, 2020, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1269-1277.
- [9] 方璐, 戴琼海. 计算光场成像[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111001.  
Fang L, Dai Q H. Computational light field imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111001.
- [10] 左超, 陈钱. 计算光学成像:何来,何处,何去,何从?[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(2): 20220110.  
Zuo C, Chen Q. Computational optical imaging: an overview[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 20220110.
- [11] 张恒, 吕雪, 李华, 等. 用于等离子体三维重建的光场反卷积方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(7): 0715001.  
Zhang H, Lü X, Li H, et al. Research on light field deconvolution algorithm for plasma three-dimensional reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0715001.
- [12] 杨墨轩, 赵源萌, 朱凤霞, 等. 基于多视角合成孔径的太赫兹光场成像去遮挡算法研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0911001.  
Yang M X, Zhao Y M, Zhu F X, et al. Terahertz light field imaging occlusion removing algorithm based on multi-perspective synthetic aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0911001.
- [13] Ng R, Levoy M, Bredif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[EB/OL]. [2023-02-05]. <http://www.graphics.stanford.edu/papers/lfcamera/lfcamera-150dpi.pdf>.
- [14] Bishop T E, Favaro P. The light field camera: extended depth of field, aliasing, and superresolution[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(5): 972-986.
- [15] Monteiro N B, Marto S, Barreto J P, et al. Depth range accuracy for plenoptic cameras[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2018, 168: 104-117.
- [16] Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera [C]//2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), April 16-17, 2009, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010.
- [17] Georgiev T, Lumsdaine A. Focused plenoptic camera and rendering[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(2): 021106.
- [18] 王红平, 王宇, 赵世辰, 等. 基于十字激光的双目视觉钻铆孔质量检测[J]. *中国激光*, 2022, 49(21): 2104002.  
Wang H P, Wang Y, Zhao S C, et al. Quality inspection of countersunk holes using binocular vision with crossed laser lines[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(21): 2104002.
- [19] 邱嘉聆, 付庄, 金惠良, 等. 体表血管近红外三维成像系统与识别算法研究[J]. *光学学报*, 2023, 43(9): 0917001.  
Qiu J L, Fu Z, Jin H L, et al. Near-infrared three-dimensional imaging system and recognition algorithm for subcutaneous blood vessels[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(9): 0917001.
- [20] Lin X, Wu J M, Zheng G A, et al. Camera array based light field microscopy[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(9): 3179-3189.
- [21] Khan M W. A survey: image segmentation techniques[J].

- International Journal of Future Computer and Communication, 2014: 89-93.
- [22] Dhanachandra N, Manglem K, Chanu Y J. Image segmentation using *K*-means clustering algorithm and subtractive clustering algorithm[J]. Procedia Computer Science, 2015, 54: 764-771.
- [23] Sammouda R, El-Zaart A. An optimized approach for prostate image segmentation using *K*-means clustering algorithm with elbow method[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021, 2021: 1-13.
- [24] Hartley R, Zisserman A. Multipleview geometry in computer vision[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 202-204.
- [25] Ghosh D, Kaabouch N. A survey on image mosaicing techniques[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 34: 1-11.
- [26] Lewis J P. Fast template matching[EB/OL]. [2023-02-05]. [http://scribblethink.org/Work/nvisionInterface/vi95\\_lewis.pdf](http://scribblethink.org/Work/nvisionInterface/vi95_lewis.pdf).