

文章编号 1004-924X(2020)10-2158-10

三维激光扫描系统中目标点云的颜色复原

沙 欧^{1,2}, 吕源治^{1*}, 凌剑勇¹, 张尧禹¹, 付瀚毅¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为建立目标表面的真实彩色三维点云数据模型,以编码标志点作为定位介质,利用目标的无色点云和彩色图像,提出一种三维点云颜色复原方法。在目标附近放置多组编码标志点,用基于激光线的三维扫描设备获取目标无色的三维点云和编码标志点信息;用彩色相机从多视角采集目标及编码标志点的彩色图像,通过 Canny 边缘检测及亚像素定位算法得到编码标志点的图像坐标;再利用改进的直接线性变换法由编码标志点的世界坐标值及像素坐标值求解出相机相对世界坐标系的位姿矩阵,通过相机成像模型建立点云与彩色图像像元的映射关系;最后,利用插值法计算局部点云的颜色并完成整个点云颜色的融合。采用该方法对多个模型进行了颜色复原实验,彩色三维点云的颜色空间位置偏差小于 0.6 mm,重建效率为 7.3×10^4 point/s,彩色三维点云与目标相似度高。该方法可以实现目标彩色三维点云重建,计算精度和效率均能够满足使用需求。

关键词:三维点云;成像模型;编码标志点;空间坐标变换;颜色复原

中图分类号:TN247;TH721 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20202810.2158

Color restoration of object surface point cloud in three-dimensional laser scanning system

SHA Ou^{1,2}, LÜ Yuan-zhi^{1*}, LING Jian-yong¹, ZHANG Yao-yu¹, FU Han-yi¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: lyuyuanzhi@163.com*

Abstract: To obtain the real colorful three-dimensional (3-D) point cloud data model of a target surface, a 3-D point cloud color restoration method is proposed. The method uses code points, based on the colorless 3-D point cloud and colorful images of an object, as the location medium. First, multiple code points were placed near the object and the colorless 3-D point cloud of the object; thereafter, the information of code points was captured by a 3-D scanning device based on a structure laser line. A color camera was then used to capture color images of the target from different perspectives, and then, using canny edge detection and a subpixel localization algorithm, coding point coordinate values in the images were calculated. Later, an improved method of direct linear transformation was used to

收稿日期:2020-03-18;修订日期:2020-04-16.

基金项目:长春市地院(校、所)合作专项(No. 17DY007);公安部开放课题(No. 2018NELKFKT03);天津市自然科学基金资助项目(No. 16JCYBJC41400);吉林省重点科技研发项目资助(No. 20180201031GX)

solve the camera pose matrix in the world coordinate system by coding point world coordinates and pixel coordinates. The corresponding relation between the point cloud and color image pixels was then set up by the camera imaging model. Finally, interpolation was used to calculate the color of the local point cloud, and thus, complete color fusion of the entire point cloud was achieved. In the experiments, the proposed method was adopted to restore the color of multiple point cloud models. The color space position deviation of the color 3-D point cloud is less than 0.6 mm, and the reconstruction efficiency is approximately 73 000 point/s. The color 3-D point cloud exhibits high similarity with the targets. Therefore, the method can achieve the goal of color 3-D point cloud reconstruction, and the achieved calculation accuracy and efficiency can satisfy user demands.

Key words: three-dimensional point cloud; model of imaging; code points; space coordinate transform; color restoration

1 引 言

三维重建是实现非接触测量、虚拟现实和逆向设计的重要方法,重建结果的精度、效率和完整性是重要指标^[1]。单目及双目三维重建大多采用单一波长的结构光投影,或采用多波段结构光,但未采集目标的颜色信息,其建立的三维点云模型也是伪彩色的。颜色信息的丢失,不利于在后处理中识别目标丰富的表面特征^[2],因此关于目标的彩色三维重建研究很重要^[3]。目前,目标的彩色三维重建方式主要有三种,一是通过深度相机(如 Kinect、RealSense)重建。有学者利用深度相机构建了大豆冠层^[4]、果树^[5]等农作物的彩色三维点云,或通过多点联网实现了大规模环境重建^[6];但深度相机的测量精度在厘米级,且测量时对光照、温度和表面特性十分敏感,一般用于场景或大尺度目标重建^[7]。二是结构光扫描重建,研究人员使用结构光扫描法实现了目标的真彩色三维重建^[8]。文献[9]使用红、绿、蓝激光扫描并分通道获取目标彩色图像进行水下目标重建,精度达到了毫米级。文献[10]通过调整结构并测量彩色相机与目标位置关系的方法,研制出舌型彩色三维测量系统,重建精度为 0.1 mm。但是结构光重建方法对测量系统结构的设计与装调要求较高,计算过程复杂,不便于广泛应用,且容易受到结构限制而无法重建完整表面的点云。三是基于特征的重建方法,一般用于三维测绘^[11]、人脸或雕塑重建等^[12],适用于具有丰富表面特征的目标重建,而对于简单纹理的扫描目标则存在技术瓶颈。

本文利用编码标志点具有旋转不变性和唯一性的特性^[13],提出了三维激光扫描系统与彩色相机相结合的便携性、高精度、全彩色模型颜色复原方法。该方法根据编码标志点空间坐标变换求解目标无色点云与彩色图像间的旋转矩阵和平移矩阵,并根据相机成像数学模型建立彩色图像像元与无色点云的映射关系,再利用二维插值法将单幅彩色图像的颜色信息复原到点云中,最后通过颜色融合算法完成整个点云颜色的匹配融合,从而实现了目标表面三维点云的颜色复原。

2 颜色复原的原理及关键算法

图 1 为颜色复原的原理示意图,图 2 为复原流程。本文所用编码标志点为带中心圆的环形编码标志点,如图 3 所示。首先,使用三维激光扫描设备(如图 4 所示)对目标及周围编码标志点进行

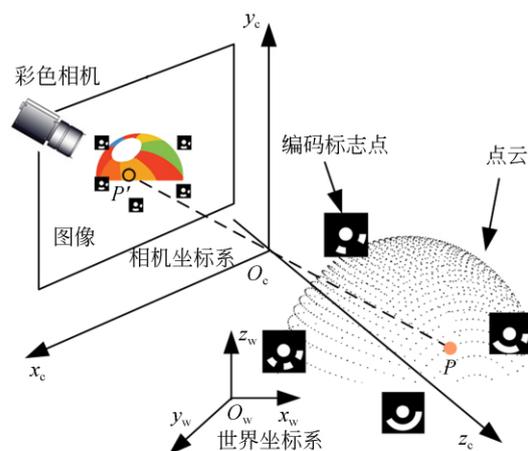


图 1 颜色复原原理示意图

Fig. 1 Principle diagram for color restoration

扫描,获取世界坐标系下目标表面的三维点云和编码标志点的编码值及空间坐标值。由于采用编码标志点作为求解彩色相机位姿的参照物,因此目标和编码标志点要相对固定。然后,使用彩色相机从空间中多个视角拍摄目标的彩色图像,彩色图像中同时包含目标和编码标志点。

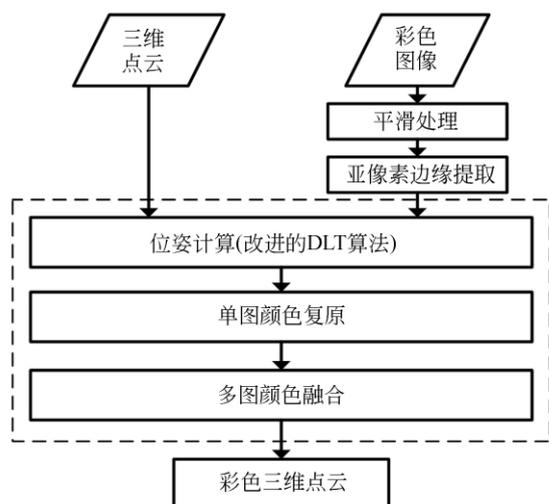


图 2 点云颜色复原流程

Fig. 2 Flow chart of point-cloud color restoration process

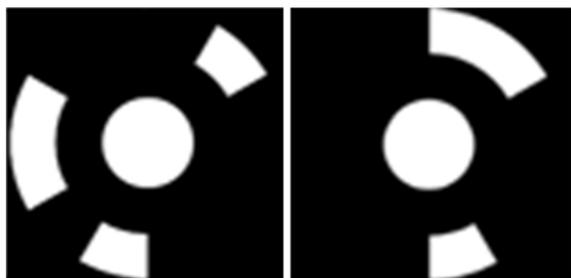


图 3 编码标志点

Fig. 3 Code points

由于编码标志点的编码值是确定且唯一的,因此采集到的彩色图像中编码标志点与世界坐标系中的编码标志点是一一对应的关系。根据编码标志点的图像坐标值与其世界坐标值,通过单目相机位姿求解算法计算出世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。这里将目标的三维点云按照旋转矩阵和平移矩阵进行空间坐标变换,得到了目标在相机坐标系下的点云。由相机成像原理可知,此时点云与图像之间符合“物与像”的关系,在相机坐标系中根据相机成像模型建立点



图 4 手持式三维激光扫描设备

Fig. 4 Photo of handheld 3-D scanning device

云和图像的映射关系,那么图像传感器表面每个像元的 RGB 颜色值即是对应点所在目标表面位置的颜色。如图 1 所示,在世界坐标系下的点 P ,根据旋转、平移矩阵和相机成像模型求出在图像中的对应点 P' ,点 P' 的颜色即为点 P 的颜色。如此将图像中每个像元的 RGB 颜色值赋给对应的点,即可在三维点云上复原出相机在该视角拍摄到的目标表面的颜色信息。依据目标的几何特征,从足够多的视角采集目标及编码标志点的彩色图像,并依次进行颜色复原,即可得到具有目标真实颜色信息的彩色三维点云。

为提高颜色复原的准确度和计算效率,彩色图像中的编码标志点需要进行亚像素计算和定位,在颜色复原时需要通过插值算法降低颜色偏差,在图像重叠部位颜色计算时需要进行颜色融合^[14]。

2.1 二维彩色图像预处理

为了提高颜色复原的精度,应对原始彩色图像进行滤波去噪处理^[15]。本文使用双边滤波算法进行去噪,输出图像的计算公式如下:

$$g(i, j) = \frac{\sum_{k, l} f(k, l) w(i, j, k, l)}{\sum_{k, l} w(i, j, k, l)}, \quad (1)$$

$$w(i, j, k, l) = \exp\left(-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|f(i, j) - f(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad (2)$$

式中: σ_d 为空域高斯函数标准差, σ_r 为值域高斯函数标准差, (k, l) 为模板中心的坐标, (i, j) 为邻域点的坐标, $f(i, j)$ 为输入图像的灰度函数, 加权系数 $w(i, j, k, l)$ 为空域核与值域核的乘积, $g(i, j)$ 为输出图像的灰度函数。

2.2 亚像素边缘提取

在计算编码标志点坐标时,本文使用亚像素级边缘提取和椭圆拟合算法,该方法的计算效率和精度均较高,计算步骤包括像素级椭圆边缘提取、亚像素级边缘提取和椭圆中心计算。

(1)像素级提取椭圆边缘。首先,采用 Canny 算子进行椭圆边缘提取得到边缘数据,包括边缘点与非边缘点;然后,使用约束条件剔除其中部分非边缘点;再通过由形态学方法提取椭圆边缘建立的第一约束和由闭运算与边缘属性相结合建立的第二约束得到较精确的边缘信息;最后,采用形态学细化剔除其中非边缘点,获得像素级椭圆边缘。

(2)亚像素级提取边缘坐标。空间矩边缘检测算法是根据单位圆内的平面阶跃边缘模型,使用边缘灰度的空间矩进行边缘的亚像素计算得到 6 阶次空间矩,再结合理想阶跃边缘模型函数,计算得到亚像素边缘。当空间矩模型为 $M \times N$ 时,得到亚像素边缘坐标如下:

$$\begin{cases} x' = x + \frac{Nl}{2} \cos \varphi \\ y' = y + \frac{Nl}{2} \sin \varphi \end{cases}, \quad (3)$$

式中: l 为模型中心到直线的距离, φ 为 l 与 x 轴夹角。

(3)椭圆曲线拟合。使用最小二乘法拟合得到的亚像素边缘,平面椭圆的目标函数为:

$$f(A, B, C, D, E) = \delta^2 (x_i^2 + A \cdot x_i y_i + B \cdot y_i^2 + C \cdot x_i + D \cdot y_i + E), \quad (4)$$

式中: A, B, C, D, E 为椭圆参数, x, y 为待拟合椭圆亚像素边缘坐标。

通过对式(4)中的椭圆参数求一阶偏导数并令偏导数为 0,即可求得 5 个参数值。

2.3 相机的位姿计算

根据编码标志点的世界坐标值与图像坐标值求解相机空间方位属于 PnP (Perspective-n-Point) 问题,也叫位姿求解,其中 n 表示点对的数目。点的世界坐标值与其图像坐标值的关系为:

$$\lambda \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot [R | t] \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $R_{3 \times 3} = [r_1 \ r_2 \ r_3]$, 包含 9 个未知量,实质可用 3 个表示绕坐标轴转动的独立变量来表示; $t_{3 \times 1}$ 同样可用 3 个表示沿坐标轴平移的独立变量表示。直接线性变换法(DLT)的思想是将位姿矩阵 $[R | t]$ 看作 12 个未知数,通过 6 对点的坐标进行线性求解。但由于没有考虑旋转矩阵的固有约束条件,且在输入噪声的影响下,通过直接线性变换求出的解未必满足约束条件,得到的姿态矩阵误差较大。旋转矩阵的固有约束条件为:

$$\begin{cases} \| r_{ir} \| = 1 \\ r_{ir} \cdot r_{jr} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $ir, jr = 1, 2, 3$ 。

通过加入固有约束的办法对算法进行改进,充分利用了旋转矩阵 $R_{3 \times 3}$ 参数间的内在联系,求解只需要 4 对点,再利用多对点建立超静定方程,可以降低噪声对结果精度的影响。先将点对坐标进行归一化,利用归一化点对坐标计算位姿矩阵;然后将位姿矩阵逆归一化得到原位姿矩阵,消去比例系数后可得到位姿矩阵的粗略解 R ;最后对粗略解 R 进行奇异值分解,可得到精确的位姿矩阵 R' 。

$$[R | t] = L / \sqrt[3]{\det(R_L)}, \quad (7)$$

$$R = UDV^T, R' = UV^T, \quad (8)$$

式中 R' 为最后得到的姿态矩阵。

2.4 颜色复原

利用得到的相机位姿矩阵,将目标的三维点云变换到对应的相机坐标系中,此时点云与相机传感器的图像是“物与像”的关系。然后,通过相机成像模型计算点云中的点在相机传感器表面的投影位置坐标,将坐标换算为像素坐标值,建立了点到彩色图像像元的映射关系,该点的颜色即是相应像元的 RGB 颜色值。

为提高颜色复原精度,本文根据坐标值对每一点的 RGB 值进行双三次插值计算,即选取该点投影位置及相邻位置 4×4 个像元的 RGB 值,依据投影位置坐标与各个像元的位置关系确定该点的 RGB 值,每个点的颜色计算公式如下:

$$q(x, y) = q(i + i_x, j + j_y) = W_1 C_{4 \times 4} W_2, \quad (9)$$

式中: W_1, W_2 表示权值, $C_{4 \times 4}$ 表示各像素的颜色矩阵。

在建立点与像元的对应关系时,常出现多个点对应同一像元的情况,本文将同一像元所有对

应点到相机坐标系 $X_c O_c Y_c$ 面的距离 z_c 进行比较,选择最小值及阈值范围内的值,相应的点即为有效点。

由于图像采集视角、距离和环境光的影响,目标表面的同一区域在不同彩色图像中的成像颜色存在差异,影响重建质量和视觉效果。为此,本文基于多视图拼接技术提出了三维点云颜色融合算法。如图 5(a)所示,两幅彩色图像分别进行颜色复原得到目标点云中两个局部点云的颜色:局部点云 I 和局部点云 II。I 与 II 存在重叠区域,重叠区域的点在两次颜色复原中得到的颜色有差异,本文在重叠区域局部点云 I 的颜色按照融合曲线进行增强,局部点云 II 的颜色则按照融合曲线进行衰减。

点云颜色融合包含三个步骤:确定点云重叠范围、计算颜色融合因子和点云颜色融合计算。首先,由两个局部点云求交集,获得重叠区域范围;然后根据重叠范围的空间尺寸计算颜色融合因子;最后对点云进行融合计算。融合因子函数为:

$$p(x) = \begin{cases} 0.5 \times (2x)^q, & (0 \leq x \leq 0.5) \\ 1 - 0.5 \times (2 \times (1-x))^q, & (0.5 \leq x \leq 1) \end{cases} \quad (10)$$

经过试验, $q=2$ 时融合效果最佳。

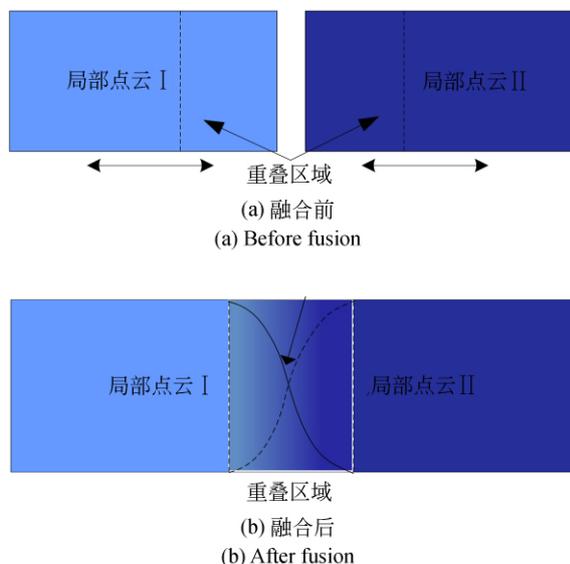


图 5 点云颜色融合示意图

Fig. 5 Schemes of point-cloud color fusion

3 实验与数据处理

3.1 实验系统搭建

实验搭建的三维点云颜色复原系统如图 6 所示。大恒彩色相机(型号 DH-SV401FC,分辨率为 780×582 ,传感器尺寸为 $1.27 \text{ cm}(1/2 \text{ inch})$)用于采集目标的彩色图像。由 6 只白色 LED 灯(色温约为 6000 K)组成的照明光源均匀分布于相机周围并通过结构件与相机固定,为彩色图像拍摄提供均匀的环境光,作为空间定位介质的圆形编码标志点和计算机(图中未画出)。此外,还包括自主研发的手持式三维激光扫描设备(见图 4)。

测量时,编码标志点需要均匀固定于目标周围,根据目标的几何尺寸合理确定编码标志点的数目,保证三维激光扫描设备和彩色相机在任意位置均能捕获 4 个以上的编码标志点。若编码标志点数目过少,则扫描失败;若编码标志点数目过多,计算效率会下降。选择不同形式的编码标志点或采用不同的布局形式对颜色映射的影响较小,只需使得三维激光扫描设备和彩色相机在任意位置能够捕获 4 个以上的编码标志点即可进行颜色映射。实际测量时应选用几何尺寸合适的编码标志点,均匀分布于目标周围即可。

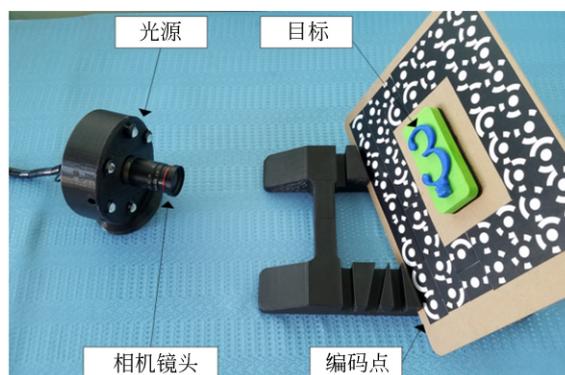


图 6 颜色复原系统的硬件组成

Fig. 6 Hardware of color restoration system

3.2 实验数据采集

本文采用张正友标定算法进行彩色相机标定,等效焦距为 1012.745 ,镜头光轴的像素坐标

为(410, 181, 284, 301), 径向与切向畸变系数分别为-0.0104 23 和 0.037 222。

如图 7 所示, 本文实验对象为立体数字和花盆。立体数字由蓝色立体数字“3”、底座和底板组成, 包含蓝、绿、黑、土黄 4 种颜色, 花盆为八角形状, 底色为白色, 侧面有红花绿叶等图案(彩图见期刊电子版)。数据采集全过程中需保持目标与编码标志点的相对位置固定。

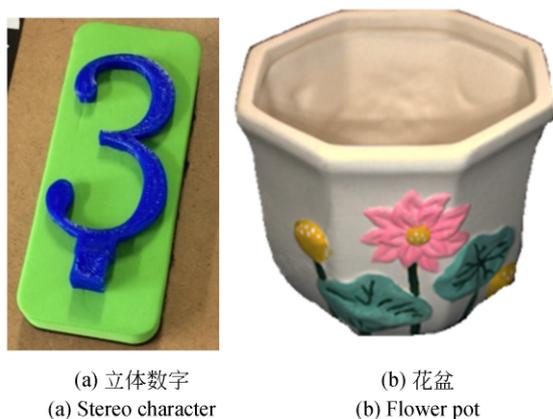


图 7 实验对象

Fig. 7 Experimental objects

首先, 用三维激光扫描设备分别扫描两个目标, 得到编码标志点信息(立体数字的编码标志点信息如表 1 所示)和三维点云(如图 8 所示)。然后, 采集彩色图像, 打开光源待亮度稳定后进行图像采集; 采集时根据实验对象选择合适的视角, 本实验在立体数字和花盆的多个视角采集了彩色图像, 如图 9 所示(彩图见期刊电子版)。

表 1 立体数字的编码标志点编码值及世界坐标值

Tab. 1 Code values and world coordinate values of code points

编码值	编码标志点坐标		
	x_i	y_i	z_i
25	114.775 658	-206.711 853	-261.821 991
33	100.669 937	-146.935 074	-289.297 668
...
183	77.803 368	-226.296 616	-252.191 284
185	85.383 095	-199.857 880	-264.572 266

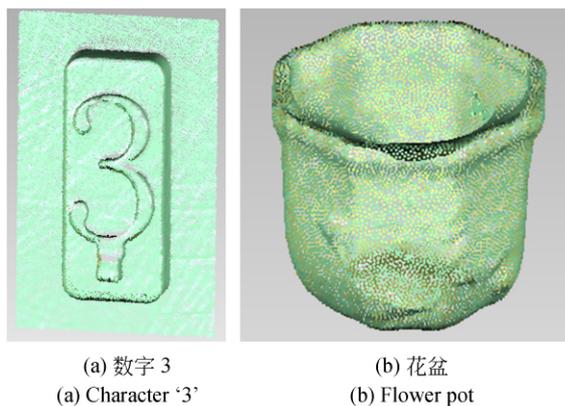
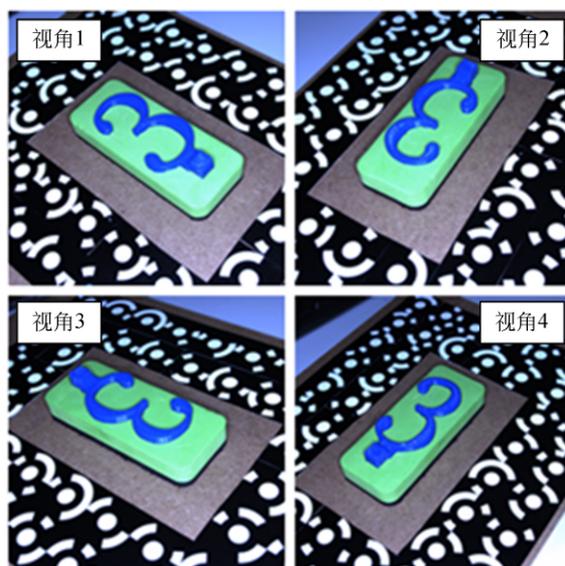


图 8 实验目标的三维点云

Fig. 8 Three-dimensional point cloud of experimental objects



(a) 立体数字原始彩色图像
(a) Original color images of stereo character



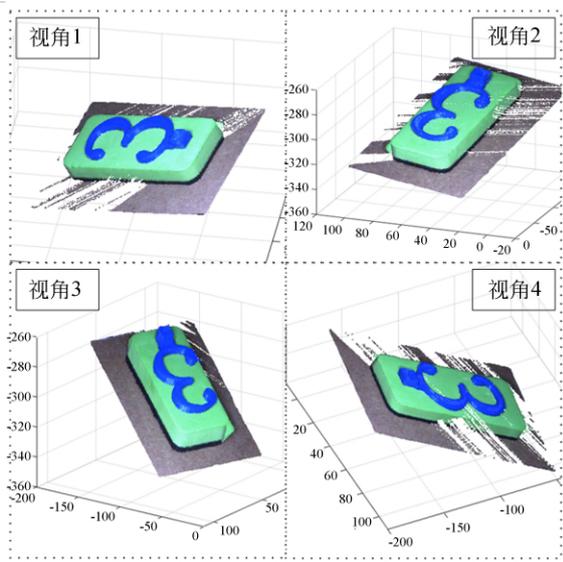
(b) 花盆的原始彩色图像
(b) Original color images of flower pot

图 9 实验目标的原始彩色图像

Fig. 9 Original color images of experimental objects

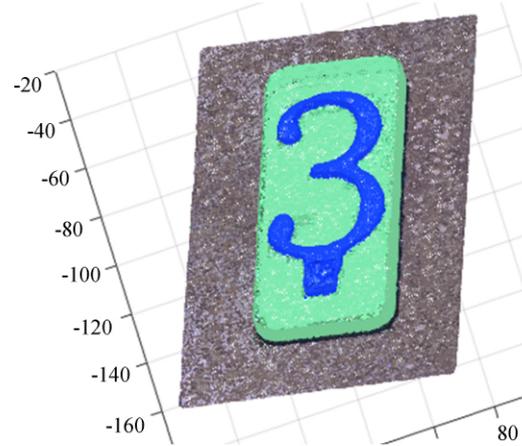
3.3 实验结果

将图 9(a)中立体数字 4 幅彩色图像的颜色信息复原到三维点云中, 分别得到了如图 10(a)



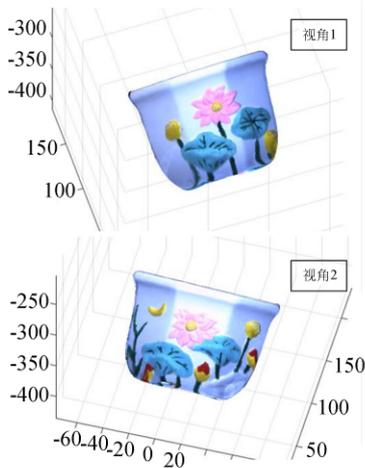
(a) 立体数字单图像复原

(a) Restoration from a perspective image of stereo character



(b) 立体数字颜色融合后的彩色点云

(b) Colorful point cloud of stereo character after fusion



(c) 花盆单图像复原

(c) Restoration from a perspective image of flower pot



(d) 花盆融合后的彩色点云

(d) Colorful point cloud of flowerpot after fusion

图 10 实验目标的彩色三维点云

Fig. 10 Colorful 3-D point cloud of experimental objects

所示 4 个视角的局部具有颜色的三维点云。

同样,由图 9(b)中花盆的 2 幅彩色图像分别得到如图 10(c)所示 2 个视角的局部具有颜色的三维点云。最后,将各个视角彩色图像复原到点云中,通过颜色融合计算即得到了具有目标表面真实颜色的三维点云,如图 10(b)和 10(d)所示。

3.4 实验结果分析

从图 9 和图 10 可以看出,本文所提方法能够将实验对象彩色图像中的颜色复原到其三维点云中,达到了建立目标彩色三维点云的目的。将图 10(a)、10(b)与图 9(a)对比,可以看出立体数字彩色点云与原图的颜色一致,从图 10(d)可以看

到花盆图案中的花心、绿叶、叶脉和花苞等细节部分,与原图 9(b)的颜色一致,从放大图 11(b)也可以分辨出以上细节,说明使用本文方法进行颜色复原时颜色真实度高。将立体数字的彩色三维点云中 4 个颜色交界处局部放大,由图 11(b)可以看出各放大图中颜色交界处有清晰的分界线(各图中红色椭圆位置)。左上图和右上图为蓝色数字与绿色底座连接处放大图,测得颜色过渡区域的最大空间尺寸分别为 0.6 mm 和 0.3 mm。左下图为底座上绿色与黑色交界,测得颜色过渡区域的最大空间尺寸为 0.5 mm。右下图为底座与底板连接处放大图,测得颜色过渡区域的最大

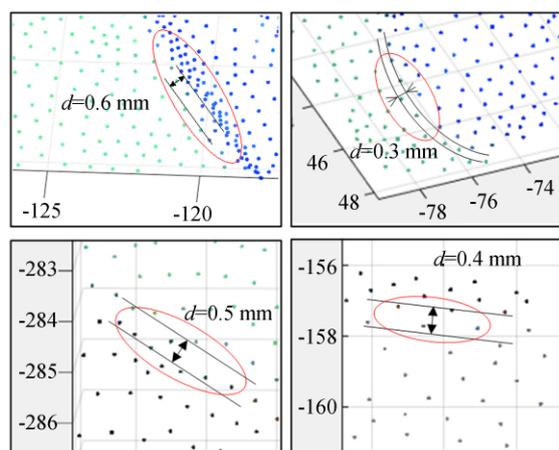
空间尺寸为 0.4 mm。在图 11(b)中选择花瓣与绿叶交界处,测得颜色过渡区域宽度为 0.6 mm,在叶脉边缘测得过渡宽度为 0.5 mm(彩图见期刊电子版)。以上数据表明,使用该方法进行颜色复原的结果具有较高的空间位置精度,颜色的最大空间位置误差不超过 0.6 mm。立体数字点云的点数为 6.23 万点,4 幅图像的处理时间为 3.6 s,计算效率为 6.9 万点/秒。花盆点云的点数为 14.66 万点,2 幅图像的处理时间为 4 s,计算效率为 7.33 万点/秒。本文实验所用的三维激光扫描设备经过国家质检中心的精度检测,测量精度为 0.03 mm。文献[4]和[5]中利用深度相机分别实

现的大豆冠层和果树重建精度均为厘米级,对比表明本文方法具有更高的测量精度。文献[9]使用结构光进行目标的三维彩色重建,精度达到了毫米级,但所用实验设备需要具备高精度且结构复杂,在测量时需要精确调整,不便于现场应用。对比表明本文方法测量精度高,测量简单、效率高,相对三维重建仅增加了一台彩色相机,测量设备简单,便于现场应用。对比文献[12]基于特征的重建方法需要被测物具有丰富的表面特征,而本文方法不依赖于特征,可以实现各类目标的三维彩色重建,并且目标的几何尺寸、形状和表面特性等对测量结果的影响小,测量结果稳定。

4 结 论

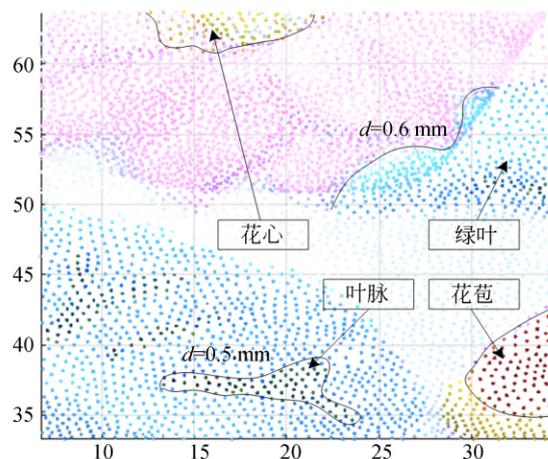
本文以编码标志点作为定位介质,将目标彩色图像映射到三维点云中,进而建立目标彩色三维点云的方法。传统结构光三维重建方法的重建精度高,但不包含颜色信息,而利用深度相机虽然能够进行彩色三维重建,但精度仅为厘米级,本文方法兼具上述两类方法的优势,既具有高的重建精度又再现了目标的真实颜色。与同类方法相比,本文方法具有更高的测量精度和测量效率,实验设备简单、操作便捷,适用于各类目标的彩色重建和现场应用,而且所需硬件投入小,易于推广应用。同时,改进了相机位姿求解算法,在原有直接线性变化法的基础上,加入了旋转矩阵中固有约束条件,降低了输入噪声的影响,提高了位姿求解精度;而且,原有 DLT 方法求解至少需要 6 对点,改进后仅需要 4 对点即可求解位姿矩阵。使用三维激光扫描设备对两个目标进行三维重建,三维重建精度为 0.03 mm,进而完成了两个目标的彩色三维点云,颜色的空间误差小于 0.6 mm。通过视觉观察,颜色真实程度良好,计算效率达到 7.3 万点/秒。

本文颜色复原方法实现了目标的三维彩色重建,在原有三维重建基础上增加了颜色信息,提高了重建完整性,适用于生物医学研究、工业检测、刑侦及文物保护等多个技术领域。例如在静脉血栓栓塞症(VTE)检测中,不仅可以依据三维点云获得体表形变数据,还可以通过皮肤颜色变化辅助医生评估患者的栓塞风险;在刑侦现场的三维足迹提取中,足迹表面常常伴随着血迹等色彩信



(a) 立体数字‘3’彩色点云局部放大

(a) Partial enlargement of colorful 3D point cloud of character ‘3’



(b) 花盆彩色点云局部放大

(b) Partial enlargement of colorful 3D point cloud of flower pot

图 11 彩色点云局部放大

Fig. 11 Partial enlargement of colorful 3D point cloud

息,这些都是破案的重要线索,通过颜色复原可以完整保留证据信息,提高破案效率。

基于以上研究,本文计划通过合理选择颜色空间,并在标准条件下,实现相机颜色标定,将得

到的彩色点云与实验对象相比对,以获得环境光、采集视角和距离对颜色复原结果的影响程度。

致 谢:感谢季华实验室"鞋服智能柔性制造技术与装备"项目给予本文的支持。

参考文献:

- [1] SHEN S H. Accurate multiple view 3D reconstruction using patch-based stereo for large-scale scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(5): 1901-1914.
- [2] 高瞻宇, 顾营迎, 吕耀宇, 等. 融合通用形变模型信息的面部三维重建[J]. *光学 精密工程*, 2018, 26(1): 184-192.
GAO ZH Y, GU Y Y, LÜ Y Y, *et al.*. Face reconstruction fused with generic morphable model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 184-192. (in Chinese)
- [3] 丁汛, 赵跃进, 丁玉奎. 基于多图像融合的 MEMS 显微三维形貌重构[J]. *光学 精密工程*, 2018, 26(5): 1275-1285.
DING X, ZHAO Y J, DING Y K. Three-dimensional microscopic reconstruction of MEMS based on multi image fusion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1275-1285. (in Chinese)
- [4] 冯佳睿, 马晓丹, 关海鸥, 等. 基于深度信息的大豆株高计算方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0515003.
FENG J R, MA X D, GUAN H O, *et al.*. Calculation method of soybean plant height based on depth information[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0515003. (in Chinese)
- [5] 郭彩玲, 刘刚. 基于颜色取样的苹果树枝干点云数据提取方法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 189-196.
GUO C L, LIU G. Point cloud extraction of apple tree canopy branch based on color sampling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 189-196. (in Chinese)
- [6] MACKNOJIA R. *Design and Calibration of a Network of RGB-D Sensors for Robotic Applications over Large Workspaces*[D]. Université d'Ottawa/University of Ottawa, 2013.
- [7] 徐连瑞, 张锦明. 基于 Kinect 的室内环境建模[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(12): 2643-2651.
XU L R, ZHANG J M. Modeling indoor environ-
- ment with kinect[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(12): 2643-2651. (in Chinese)
- [8] LEE D Y, PARK S A, LEE S J, *et al.*. Segmental tracheal reconstruction by 3D-printed scaffold: Pivotal role of asymmetrically porous membrane[J]. *The Laryngoscope*, 2016, 126(9): E304-E309.
- [9] 丁忠军, 赵子毅, 张春堂, 等. 载人潜水器的深海地貌线结构光三维重建[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(5): 0503001.
DING ZH J, ZHAO Z Y, ZHANG CH T, *et al.*. 3D reconstruction of deep sea geomorphologic linear structured light based on manned submersible[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0503001. (in Chinese)
- [10] 王鹏, 杨文超, 孙长库, 等. 舌面彩色三维点云的舌体分割及舌裂纹提取[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(S1): 88-95.
WANG P, YANG W CH, SUN CH K, *et al.*. Tongue segmentation and tongue crack extraction of tongue 3D color point cloud[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): 88-95. (in Chinese)
- [11] TOPAK F, PEKERIÇLI M K, TANYER A M. Technological viability assessment of bluetooth low energy technology for indoor localization[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2018, 32(5): 04018034.
- [12] 冯筠, 延瑜瑜, 赵妍, 等. 基于学习不变特征变换的兵马俑图像分区匹配[J]. *光学 精密工程*, 2018, 26(7): 1774-1783.
FENG J, YAN Y Y, ZHAO Y, *et al.*. A terracotta image partition matching method based on learned invariant feature transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1774-1783. (in Chinese)
- [13] 屈也频, 侯旺. 基于误差传播理论的 PnP 问题姿态精度分析[J]. *光学 精密工程*, 2019, 27(2): 479-487.
QU Y P, HOU W. Attitude accuracy analysis of PnP based on error propagation theory[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 479-487. (in Chinese)
- [14] QU Y F, HUANG J Y, ZHANG X. Rapid 3D reconstruction for image sequence acquired from UAV camera[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): E225.

- [15] 王浩云, 闫茹琪, 周小莉, 等. 基于局部点云的苹果外形指标估测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 205-213.
WANG H Y, YAN R Q, ZHOU X L, *et al.*.

Apple shape index estimation method based on local point cloud[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 205-213. (in Chinese)

作者简介:



沙 欧(1985—),男,江苏人,博士研究生,助理研究员,2012年于浙江大学获得硕士学位,主要从事结构设计、计算机视觉等研究。E-mail: shaning85@126.com

导师简介:



张尧禹(1973—),男,吉林人,研究员,2003年于长春光机所获得博士学位,博士生导师,主要从事精密跟踪测量技术、变形测量、经纬仪结构设计、火控技术及目标辐射特性测量技术。E-mail: yaoyu270@sina.com

通讯作者:



吕源治(1986—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,副研究员,2014年于吉林大学获得博士学位,主要从事立体图像采集、处理、编码与显示等方面的研究。E-mail: lyuyuanzhi@163.com