

一种基于智能手机成像的三维重建方法

曾昭鹏¹, 张江乐¹, 魏志尚¹, 吴军^{1*}, 陈芳平²

¹中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;

²中国民航大学计算机科学与技术学院, 天津 300300

摘要 物体形貌三维重建技术是视觉测量领域研究的热点, 当前使用工业相机进行双目视觉测量的方法存在设备费用昂贵、操作过程复杂及需专业软件和相关技术人员进行后期处理等不足。针对这些方面的不足, 研究了基于智能手机摄像头的三维重建方法, 利用智能手机从不同角度拍摄多张图片, 通过手机相机定标、图像预处理、特征点检测和匹配、基础矩阵和本质矩阵计算及奇异值分解的方法来实现图像的三维模型重建。实验结果表明, 该方法基本可以达到一般工业相机的测量精度, 满足日常应用中基本的三维形貌建模需求, 可以极大地拓展视觉测量的应用范围。

关键词 机器视觉; 三维重建; 单目视觉; 智能手机

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.111502

Three-Dimensional Reconstruction Method Based on Smartphone Imaging

Zeng Zhaopeng¹, Zhang Jiangle¹, Wei Zhishang¹, Wu Jun^{1*}, Chen Fangping²

¹Aviation Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²School of Computer Science and Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract Three-dimensional reconstruction of the topography of objects is extensively studied in the field of vision measurement. Current industrial cameras use the binocular vision measurement method; however, this method requires expensive equipment, specialized software, and trained technical personnel as well as involves complicated operational processes. To mitigate these shortcomings, this study proposes a three-dimensional reconstruction method based on a smartphone camera. Multiple pictures are captured from different angles using a smartphone, and their three-dimensional models are reconstructed using smartphone camera calibration, image preprocessing, feature point detection and matching, basic and essential matrix calculation, and singular value decomposition. Experimental results show that the proposed method can achieve the measurement accuracy of the general industrial camera, meet basic requirements of three-dimensional topography modeling, and considerably expand the scope of vision measurement applications.

Key words machine vision; three-dimensional reconstruction; monocular vision; smartphone

OCIS codes 150.0155; 100.2000; 100.3010

1 引言

三维重建技术是随着机器视觉测量而快速发展起来的非接触测量方法, 被广泛应用于逆向工程、机器人控制、机械制造、三维游戏、生物医学以及考古等专业领域^[1]。传统的视觉测量方法常采用双目视

觉测量原理^[2-3], 使用专业的工业相机采集物体表面图像, 进而通过图像匹配来实现点云数据的测量^[4], 目前已有较为成熟的算法, 例如王珊等^[1]提出的基于模仿人眼的双目单视面的三维重建技术, 李硕明等^[5]提出的基于角点与直线联合的三阶段立体匹配算法。然而传统的测量过程一般均需由工业相机采集

收稿日期: 2018-04-09; **修回日期:** 2018-05-14; **录用日期:** 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金项目(U1533111)、精密测试及仪器国家重点实验室开放基金(pilab1707)、大学生创新创业训练计划项目(201710059040)

* **E-mail:** j_wu@cauc.edu.cn

图像,并由专业的测量软件完成数据的处理,测量过程较为复杂,设备也较为昂贵,这些都限制了三维重建技术在日常应用中的普及^[6]。随着智能手机的广泛使用,手机摄像头的性能不断提升,利用智能手机摄像头获取物体三维形貌模型是当前研究的热点^[7]。手机摄像头的特点是焦距较短,且由于手机成像均采用了自动对焦技术,其焦距也不固定,因此采用手机摄像头测量三维形貌不能直接应用传统的双目视觉测量技术。本文通过手机摄像头的手动成像模式或通过专业 APP 使手机进行定焦距拍摄,并对内部参数矩阵实现标定,然后通过单目立体视觉

技术模拟人眼眼球转动条件,从不同方向对物体进行拍摄。假设物体在拍摄时段内没有任何变化,可将其等效为双目模型。通过对不同姿态下拍摄的图像进行匹配,重构三维模型,并通过基准点的测量构建像素尺度与真实尺度的比例关系,进而得到物体的三维点云数据,为人们提供一种简单、实用的三维模型构建方法。

2 三维模型重建算法

利用智能手机相机进行三维重建需从拍摄的两张图像提取所需信息,具体过程如图 1 所示。

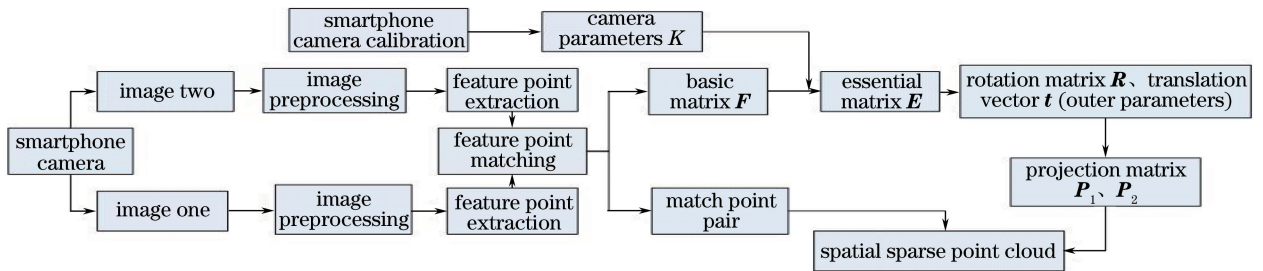


图 1 三维重建算法流程图

Fig. 1 Flow chart of three-dimensional reconstruction algorithm

2.1 手机相机标定

在建立三维物体形貌之前,首先应对光学元件的信息进行确认。目前,国内外许多研究者成功研究了许多比较成熟的相机标定算法,如两步标定方法和张正友标定方法^[8]。张正友提出的基于棋盘格的张氏标定法是一种经典的标定方法,该方法通过从不同的角度拍摄多幅棋盘格图像来求解相机的参数,对相机标定的精度很高^[9]。基于此,采用张氏标定法进行标定,相对于自标定,它精度较高,稳健性好且适应多种场合,操作更加简单方便。标定时需要对棋盘格进行多角度的拍摄,将图像与模板进行匹配得到单位矩阵 H ,进而求出该矩阵的线性解,即可得到手机相机的内参数。为了简化计算,假设棋盘格标定板位于 xOy 平面上,则:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M} = [X \ Y \ 1]^T$ 为棋盘格标定板上点在像平面坐标系下的齐次坐标; $\mathbf{m} = [u \ v \ 1]^T$ 为 $\mathbf{M} = [X \ Y \ 1]^T$ 投影到像平面坐标系下的齐次坐标;

\mathbf{K} 为手机相机内参数矩阵; s 是尺度因子; $[r_1 \ r_2 \ r_3]$ 和 t 是手机外参数,即分别为手机相机的旋转矩阵和平移向量。

分别对标定板采集多幅不同图像,通过(1)式建立方程组,求解即可得到相机参数。为了提高数据的精度,可以应用最小二乘法和极大似然法对所求参数进行优化。

2.2 图像预处理

在自然条件下拍摄时,两次拍摄的角度不同会导致两次拍摄接收到的光强略有差别。这将导致实际获得的图像对中相同点的灰度值存在差异。如果没有在特征匹配前减小这些差异,重建的精度会受到严重影响。因此,需要对拍摄的图像进行相应的预处理,降低环境中噪声对图像的不利影响。

2.2.1 中值滤波

在图像的预处理中,经常采用中值滤波法来降低脉冲噪声对图像的污染。它不仅能够很好地保护图像的边缘锐度,同时也不会丢失图像的细节特征。

2.2.2 图像特征增强

Retinex 理论认为,人眼所能接受到的物体图像 Q 是由物体表面对入射光 L 反射得到的,反射率 R 由物体决定,不受入射光 L 的影响。即

$$Q(x, y) = R(x, y) \times L(x, y). \quad (2)$$

而图像增强的目的就是 from Q 中估计出 L ,进而分解

得到 R , 借此来减少外界光的影响, 以改善图像的显示效果。具体处理过程为

① 取对数, 将乘积转化为和, 即

$$\log Q = \log R + \log L. \quad (3)$$

② 利用高斯卷积函数 $G(x, y)$ 对分量 L 进行估测, 并将 L 的分量估测值从 Q 中除去, 即可得到 R :

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\tau^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\tau^2}\right], \quad (4)$$

$$L = f(Q), \quad (5)$$

$$R = Q/f(Q), \quad (6)$$

式中: τ 为尺度参数, τ 较小时, $G(x, y)$ 相对陡峭, 卷积后得到的 L 波动也相对较大, τ 较大时, 情况相反; $f(Q)$ 为对 L 的估计。

Frankel-McCann Retinex 图像特征增强算法是由 McCann 和 Frankel 一起提出的一种预处理算法。这种算法是一种基于多次迭代的 Retinex 算法, 即取一条特定的路径, 对输入图像进行多次采样, 经过几次的迭代后, 误差值将会降到最低。

图像的信噪比可以很好地评价图像预处理的效果。一般情况下, 噪声属于加性的高斯白噪声, 定义信噪比为含噪声图像均值与噪声方差之比。图像的信噪比越高, 预处理效果越好。

2.3 图像的特征点提取

2.3.1 Harris 角点检测

在特征点检测中, 角点检测是最常用的方法之一。角点检测有许多成熟的算法, 比如 Harris 算子和 SUSAN 算子。采用的 Harris 算子是基于图像灰度梯度变化的检测算子, 被众多学者认为是角点检测算法中较为理想的算法。Harris 理论^[10]认为, 先在图像中任意选取一个像素点并以其为中心, 构造一个小窗口, 然后向各个方向移动该小窗口。根据小窗口内灰度的变化情况来确定该像素点是否为所需提取的特征点。该过程可表示为

$$E(u, v) = \sum_{x, y} W(x, y) \cdot |I(x + u, y + v) - I(x, y)|^2, \quad (7)$$

式中: $E(u, v)$ 为小窗口的灰度变化平均值; I 为灰度变化系数; $W(x, y)$ 为窗口滤波系数, 一般取高斯加权函数, 可表示为

$$W(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/\sigma^2], \quad (8)$$

$$N = G(\sigma) \otimes \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 & \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial y}\right) \\ \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial y}\right) & \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中, $G(\sigma)$ 表示均值为零, 方差为 σ 的模板, 将运算

的结果用于高斯滤波。

一般情况下, 像素点的响应值 V_R 可由(10)式求得, 为了判断该点是否为角点, 在此引入一个阈值 T 。当 V_R 比预先设定的 T 大时, 即判断其为角点; 否则, 不是角点。

$$V_R = \det N - k(\text{trace } N)^2, \quad (10)$$

式中, $\det N$ 为矩阵 N 的行列式, $\text{trace } N$ 为矩阵 N 的迹。

2.3.2 SURF 特征提取算法

SURF 算法由 Bay 等^[11]提出, 采用 Hessian 矩阵、积分图像、Harr 小波相结合的方式, 与 SIFT 算法相比, SURF 算法的复杂度和运算量显著降低^[12]。SURF 算法的具体提取过程可归纳为以下四个步骤。

1) 构造高斯金字塔尺度空间进行检测

为了使 SURF 算法具有尺度不变性, SURF 算法利用大小不同的方块滤波器对原始图像进行滤波, 组成图像金字塔^[13]。高斯金字塔中的每一层经过 Hessian 矩阵计算后, 可求出其极值点。在尺度为 Δ 处, 可将图像 $Q(x, y)$ 中的像素点 x 的 Hessian 矩阵定义为

$$H(x, \Delta) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, \Delta) & L_{xy}(x, \Delta) \\ L_{xy}(x, \Delta) & L_{yy}(x, \Delta) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: $L_{xx}(x, \Delta)$ 为二阶标准高斯函数偏导数与图像的二维卷积, L_{xy} 和 L_{yy} 与之相似。

2) 对检测到的极值点进行定位

金字塔中每一层的极值点经过 Hessian 矩阵求出后, 为了判断该点是否为极值点, 可以对该点进行非极大值抑制, 同时与该邻域内的 26 个像素点进行比较。若该极值点是特征点, 则它的特征值为最大或最小。最后通过对图像空间和尺度空间进行三维线性插值的方法, 可以实现对极值点的精确定位。

3) 特征点主方向的选取

在某个特征点的邻域内, 构造一个半径为 $6s$ (s : 特征点尺度) 的圆, 并在这个圆内取一个角度为 60° 的扇形, 然后按一定的时间间隔、按扇形方向旋转。统计该邻域内的 Haar 小波特征总和, 将 Haar 特征总和最大的方向定为主向^[14]。

4) SURF 描述算子的构造

选取特征点主方向之后, 需构造描述算子。在特征点的邻域内, 构造一个 $20s \times 20s$ 的正方形区域, 并沿主方向将其划分成 4×4 的子区域^[15]。通过计算每个子区域的 $\sum dx$ 、 $\sum |dx|$ 、 $\sum dy$ 、

$\sum |dy|$ 可得到 64 维向量。该向量即为特征点描述算子。

综合使用 Harris 角点检测算法与 SURF 特征提取算法, 提高提取精度的同时也极大地提高了算法运行速度。

2.4 图像的特征点匹配

利用 Harris、SURF 提取算法提取特征点后, 得到了每个特征点的描述算子。而这些描述算子都是向量, 利用欧式距离判别法^[16]可以寻找原始图像与待匹配图像的匹配对^[17], 判别方法为

$$d(R_{1_i}, R_{2_i}) = \sqrt{\sum_{j=1}^{64} (R_{1_{ij}} - R_{2_{ij}})^2}, \quad (12)$$

式中: R_{1_i}, R_{2_i} 是两幅图像中的特征点描述算子。

原始图像中的任意一个特征点, 都可以通过(12)式找到待匹配图像中与原始图像欧氏距离最近的两个特征点。当这两个欧式距离 d_1, d_2 的比值 d_1/d_2 小于预设阈值 ϵ 时, 认为该特征点匹配正确。

受前期拍摄环境亮度或拍摄角度的影响, 匹配过程中不可避免地会出现误匹配。为了尽量减小误差, 采用 RANSAC 算法消除误匹配。其原理是建立一个约束矩阵, 在约束矩阵下, 对特征点进行迭代。迭代次数越多, 匹配的正确率越高, 多次迭代可以有效地减少误匹配点, 提高匹配精度。

2.5 三维形貌重建

在图像匹配之后, 构造物体在三维坐标系中立体结构需解算物体的三维点云。具体求解过程可分为以下步骤。

1) 解算基本矩阵 F

8 点法是解算基础矩阵最简单的方法。2.4 节提到的 RANSAC 算法不仅可以消除误匹配点, 而且可以找到基础矩阵 F 。具体思路如下: 首先随机选择 8 个点, 根据这 8 个点可以初步估计出一个基础矩阵; 然后计算用这个基础矩阵验算成功的点对数; 如此重复多次, 将验算成功的点对数最多的基础矩阵作为最终的基础矩阵 F 。

2) 计算本质矩阵 E

根据求得的基础矩阵 F 即可求得本质矩阵 E :

$$E = K_1^T F K_1,$$

$$F = (K_1^{-1})^T [t]_x R K_1^{-1}, \quad (13)$$

式中: K_1 为手机相机的内参数矩阵; $[t]_x$ 为手机相机的外参数平移矩阵; R 为手机相机外参数旋转矩阵。

3) 确定手机相机的外参数

由(13)式可知: 本质矩阵 E 可由基本矩阵 F 与

手机相机内参 K_1 经过简单的运算求出。所以在求出基本矩阵 F 与手机相机内参 K_1 之后, 对本质矩阵 E 进行奇异值分解, 即可得到手机相机的平移矩阵 $[t]_x$ 与旋转矩阵 R 。

4) 根据手机相机的内参和外参, 求解投影矩阵 P_1 和 P_2

原始图像与待匹配图像之间存在着手机相机的投影矩阵, 假设原始图像的投影矩阵为 P_1 , 对矩阵 P_1 进行平移与旋转操作后, P_1 落到待匹配图像的相机坐标系下, 在该坐标系下的矩阵即为投影矩阵 P_2 , 求解公式为

$$P_1 = K_1 \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$P_2 = K_1 [R \quad t]. \quad (15)$$

5) 利用投影矩阵得到空间稀疏点云

对于原始图像的投影矩阵 P_1 , 取 P_{11}, P_{12}, P_{13} 为 P_1 的行向量, $(x_i, y_i, 1)^T$ 为原始图像投影矩阵上第 i 个匹配点的坐标, X_i 为待匹配图像上与原始图像所对应的点的坐标, ζ 为深度因子, 则

$$\zeta \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \end{bmatrix} X_i. \quad (16)$$

对(16)式进行变换, 则有

$$\begin{bmatrix} P_{13}x_i & -P_{11} \\ P_{13}y_i & -P_{12} \end{bmatrix} X_i = \mathbf{0}. \quad (17)$$

对于投影矩阵 P_2 , 也有上述类似的关系, 即

$$\begin{bmatrix} P_{23}x'_i & -P_{21} \\ P_{23}y'_i & -P_{22} \end{bmatrix} X_i = \mathbf{0}. \quad (18)$$

联立(17)、(18)式, 可得

$$\begin{bmatrix} P_{13}x_i & -P_{11} \\ P_{13}y_i & -P_{12} \\ P_{23}x'_i & -P_{21} \\ P_{23}y'_i & -P_{22} \end{bmatrix} X_i = \mathbf{0}. \quad (19)$$

观察(19)式可知, (19)式是利用四个已经构建出来的方程, 求解三个未知量, 对(19)式左边的矩阵进行归一化处理, 处理完之后进行分解, 即可求解出 X_i 。如此, 便可求得空间稀疏点云。

3 实验结果及分析

按照上述方法对智能手机拍摄的图像进行三维重建实验, 采用工业双目相机对待建物体进行三维重建实验, 并将两者结果进行对比。实验平台为小

米 6、HD-U500 迈迪微视工业相机和表面喷白漆的航空发动机叶片模型。手机相关参数如下:分辨率为 $1920 \text{ dpi} \times 1080 \text{ dpi}$;广角镜头焦距为 27 mm ,长焦镜头焦距为 56 mm ;广角镜头光圈为 $f/1.8$,长焦镜头光圈为 $f/2.6$ 。工业相机参数如下:分辨率为 $2592 \text{ dpi} \times 1944 \text{ dpi}$;像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$;焦距为 40 mm 。

首先分别对智能手机相机和工业相机进行参数

标定,标定所用到的工具是 $63 \text{ mm} \times 63 \text{ mm}$ 的棋盘格标定板。在一个平面上,将标定板固定,从上下左右等 20 个不同的角度拍摄图像。使用张正友标定法得到的手机相机和工业相机参数如表 1 所示,手机相机和工业相机标定的残差分布图如图 2 所示,棋盘格标定板如图 3 所示。由图 2 可知,手机相机标定的精度约为 0.84 pixel ,工业相机标定的精度约为 0.39 pixel 。

表 1 相机参数

Table 1 Camera parameters

| Camera type | Camera parameter | | |
|-------------------|--|--|---------------------------|
| | Internal reference matrix | Radial distortion | Tangential distortion |
| Smartphone camera | $\begin{bmatrix} 3387.179 & 0 & 0 \\ 2.064 & 3390.172 & 0 \\ 1908.387 & 1518.184 & 1 \end{bmatrix}$ | $[0.3421 \quad -1.8547 \quad 0.5462]$ | $[-0.0133 \quad -0.0086]$ |
| Industrial camera | Left camera $\begin{bmatrix} 7344.064 & 0 & 0 \\ -0.176 & 7394.558 & 0 \\ 1254.329 & 1134.072 & 1 \end{bmatrix}$ | $[0.0384 \quad -0.0250 \quad -0.0587]$ | $[0.0011 \quad 0.0008]$ |
| | Right camera $\begin{bmatrix} 7289.634 & 0 & 0 \\ -2.678 & 7197.657 & 0 \\ 1254.305 & 1256.903 & 1 \end{bmatrix}$ | $[0.0412 \quad -0.0213 \quad -0.0637]$ | $[0.0017 \quad 0.0012]$ |

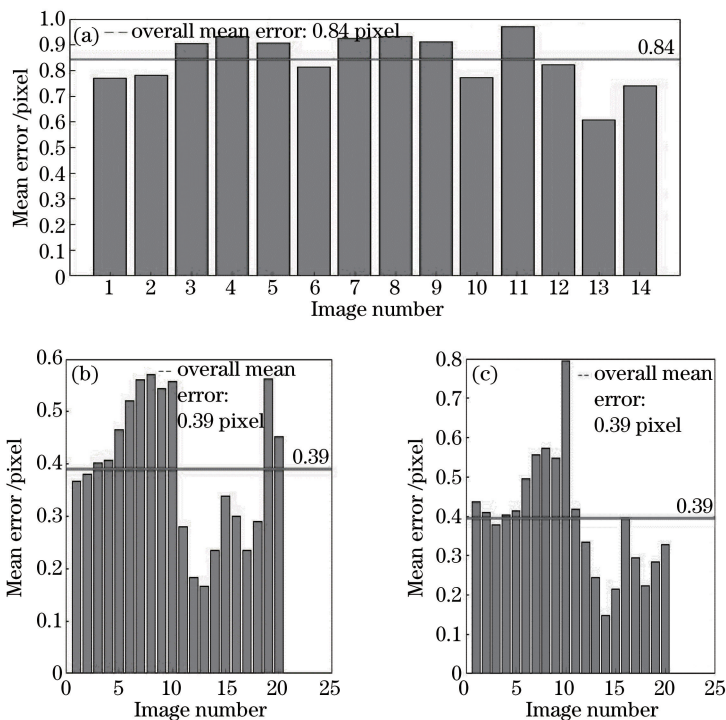


图 2 标定残差图。(a)手机相机;(b)工业相机左侧相机;(c)工业相机右侧相机

Fig. 2 Calibration residual diagram. (a) Smartphone camera; (b) left camera of industrial camera; (c) right camera of industrial camera

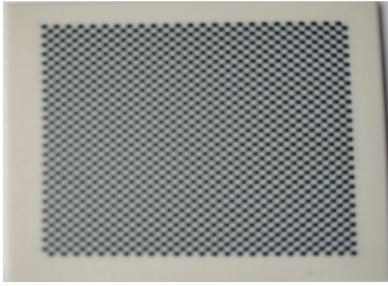


图3 63 mm×63 mm 棋盘格标定板
Fig. 3 Checkerboard calibration plate
(dimensions: 63 mm×63 mm)

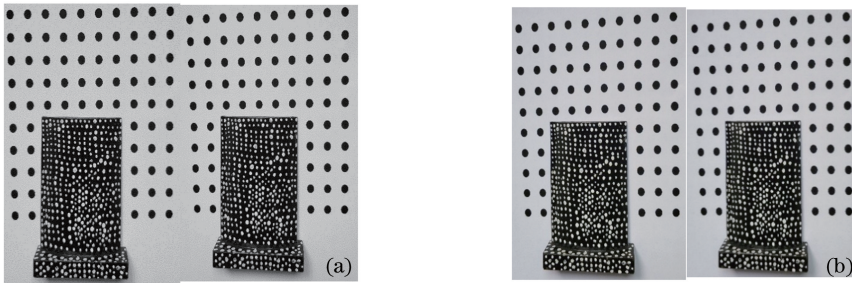


图4 拍摄的图像。(a)手机相机;(b)工业相机

Fig. 4 Image captured. (a) Smartphone camera; (b) industrial camera

表2 图像预处理前后的信噪比

Table 2 Signal-to-noise ratio of images before and after pretreatment

| Image | | Original image /mm | After feature enhancement /mm | Median filter /mm |
|----------------------|------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------|
| Smartphone camera | Location 1 | 22.0182 | 22.0517 | 22.1054 |
| | Location 2 | 22.1573 | 22.2186 | 22.2961 |
| Industrial camera | Left | 24.4737 | 24.5019 | 24.5873 |
| | Right | 24.3971 | 24.5341 | 24.5931 |

最后,根据匹配结果完成基础矩阵和本质矩阵的计算,进而求出手机相机和工业相机的外参数,利用所得到的内外参数计算出投影矩阵,根据投影矩阵得到物体空间稀疏点云,完成三维重建。重建结果如图5所示。

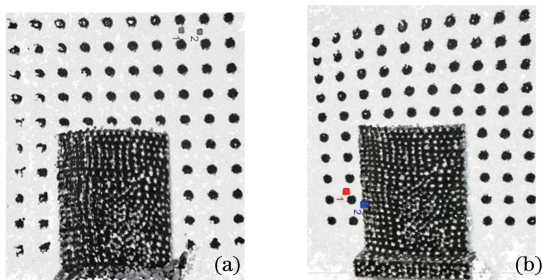


图5 三维重建结果。(a)手机相机;(b)工业相机
Fig. 5 Three-dimensional reconstruction results.
(a) Smartphone camera; (b) industrial camera

其次,使用智能手机和工业相机分别在两个不同位置对重建物体拍摄两张图像,拍摄距离(手机相机距物体的距离)为20 cm,图像如图4所示。对图像进行中值滤波和特征增强处理,得到预处理前后的信噪比如表2所示。从表中数据可以看出,图像经过中值滤波和特征增强处理后,图像信噪比与原始图像相比有所提高,说明图像预处理具有一定的效果。

然后分别对手机相机和工业相机拍摄的两张图像进行 Harris 和 SURF 特征点提取匹配,其中手机相机共找到 935 对匹配点,工业相机共找到 984 对匹配点。

为了定量分析手机相机三维建模的精度,在拍摄前将待重建物体放在标有基准点的标准模板上(图6)。标准模板相邻两个基准点的距离为20 mm,误差为5 μm。相邻基准点在相机坐标系下的距离可以由解算出来的点云坐标通过距离公式求得,对所有相邻基准点的距离(共117组)取平均即可得到相邻基准

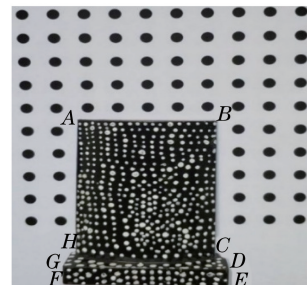


图6 带基准点的图像
Fig. 6 Image with reference points

点的点云距离平均值。由此可以求出相邻两个基准点在相机坐标系的点云距离平均值相对于世界坐标系实际距离平均值的尺度因子 s 。相邻基准点的实际距离和在相机坐标系的距离如表 3 所示。

待重建物体在相机坐标系下的尺寸同样可以由点云根据距离公式求得,通过尺度因子 s 可以反求

出待重建物体的计算尺寸,待重建物体的实际尺寸可以通过游标卡尺测量出,如此即可分别求出用手机相机和工业相机进行三维建模的精度。手机相机所得待重建物体的三维坐标、尺寸和误差如表 4 所示。工业相机所得待重建物体的三维坐标、尺寸和误差如表 5 所示。

表 3 相邻基准点的距离

Table 3 Distance of adjacent data points

| Device name | Average of point cloud distance /mm | Average of point actual distance /mm | Scale factor s |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| Smartphone camera | 0.625 | 10.00 | 0.0625 |
| Industrial camera | 0.690 | 10.00 | 0.0690 |

表 4 手机相机重建的坐标、尺寸和误差

Table 4 Coordinates, dimensions, and errors of smartphone camera reconstruction

| Object to be reconstructed | Coordinate of the point cloud | Point cloud distance /mm | Calculate distance /mm | Measuring distance /mm | Absolute error /mm | Relative error /% |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| A | (0.66,3.25,16) | | | | | |
| B | (-0.63,0.70,17.14) | 3.96 | 63.42 | 62.68 | 0.74 | 1.18 |
| C | (5.54,-1.89,17.54) | 5.07 | 81.09 | 80.18 | 0.91 | 1.13 |
| D | (7.39,-1.51,13.78) | | | | | |
| E | (7.84,-1.55,14.29) | 0.68 | 10.90 | 10.32 | 0.58 | 5.63 |
| F | (7.45,2.78,15.18) | 4.44 | 71.00 | 70.00 | 1.00 | 1.43 |
| G | (7.44,3.42,15.43) | 0.69 | 10.99 | 10.52 | 0.47 | 4.51 |
| H | (5.59,3.34,16.92) | | | | | |
| A | (0.66,3.25,16.81) | 4.93 | 78.91 | 80.20 | -1.29 | -1.61 |
| Absolute average | | | | | 0.83 | 2.58 |

表 5 工业相机重建的坐标、尺寸和误差

Table 5 Coordinates, dimensions, and errors of industrial camera reconstruction

| Object to be reconstructed | Coordinate of the point cloud | Point cloud distance /mm | Calculate distance /mm | Measuring distance /mm | Absolute error /mm | Relative error /% |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| A | (0.44,1.54,8.33) | | | | | |
| B | (3.49,-0.77,10.39) | 4.35 | 62.98 | 62.68 | 0.30 | 0.40 |
| C | (7.88,-3.96,11.54) | 5.55 | 80.39 | 80.18 | 0.21 | 0.27 |
| D | (7.91,-3.98,11.64) | | | | | |
| E | (8.21,-4.03,10.95) | 0.75 | 10.93 | 10.32 | 0.61 | 5.89 |
| F | (4.19,-1.41,10.19) | 4.86 | 70.41 | 70.00 | 0.41 | 0.58 |
| G | (3.91,-1.38,10.80) | 0.67 | 9.74 | 10.52 | -0.78 | 7.44 |
| H | (3.41,4.69,11.68) | | | | | |
| A | (0.44,1.54,8.33) | 5.47 | 79.34 | 80.20 | -0.86 | -1.08 |
| Absolute average | | | | | 0.53 | 2.62 |

Note: Absolute average in Tables 4 and 5 refers to the average of the absolute value of the parameter being evaluated.

由表 4 和表 5 数据可知,智能手机相机三维重建的精度大约为 0.8 mm,最大误差不超过 2 mm;而工业相机的精度大约为 0.5 mm,最大约为 1 mm。因此,在相同的状态下,两者重建精度基本处于同一

量级,智能手机相机重建的精度可以满足大多数日常应用场合的要求,具备一定的实用价值。由于本方法面向日常生活应用,并非工业级的高精度测量,故设备的热效应、动态范围、响应速度及被测物的拓

扑结构所造成的影响可基本忽略。

为了进一步研究拍摄距离(手机距物体的距离)对重建精度的影响,重复上述实验方法,分别在拍摄距离为 15, 20, 25, 30 cm 处对待测物体进行重建,得到的重建精度如表 6 所示。由表中数据可知,重建精度随着拍摄距离的增大而有一定降低,但在保证所采集的图像清晰的情况下,对重建精度影响不大。

表 6 不同拍摄距离下的重建精度
Table 6 Reconstruction accuracy at different shooting distances

| Shooting distance /cm | Reconstruction accuracy /mm |
|-----------------------|-----------------------------|
| 15 | 0.82 |
| 20 | 0.83 |
| 25 | 0.83 |
| 30 | 0.85 |

4 结 论

利用智能手机相机,通过单目视觉测量技术来实现物体三维形貌重建,具体操作过程可归结为:对图像进行滤波与特征增强处理后,利用 Harris 和 SURF 算法对图像的特征点进行提取与匹配。为了提高匹配精度,剔除了匹配过程中的误匹配点。之后,由 8 点法计算基础矩阵,求出本质矩阵并将其分解为手机相机的外参。结合由张正友标定得到的手机相机内参,通过透视投影关系,便可将被测物体所在的世界坐标系的三维坐标重建出来,完成三维重建。实验结果表明,采用智能手机成像的三维形貌重建精度可基本达到一般工业相机的水平,满足日常应用中基本的三维形貌建模需求,极大地拓展了视觉测量的应用范围。

参 考 文 献

- [1] Wang S, Xu X. 3D reconstruction based on horopter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0515004.
王珊, 徐晓. 基于双目单视面的三维重建 [J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0515004.
- [2] Lü Y W, Kang K. Research on three-dimensional reconstruction and stitching based on binocular stereo vision [J]. *Optoelectronic Technology*, 2016, 36(4): 237-241.
吕耀文, 康凯. 基于双目视觉的三维重建和拼接技术研究 [J]. *光电子技术*, 2016, 36(4): 237-241.
- [3] Lu Y, Li X Y, Xu X P. Research on the technology of 3D reconstruction based on binocular stereo vision [J]. *Journal of Changchun University of Technology*, 2015, 36(6): 678-682.
卢毅, 李晓艳, 徐熙平. 双目立体视觉三维重建技术 [J]. *长春工业大学学报*, 2015, 36(6): 678-682.
- [4] Chen Q. 3D reconstruction based on binocular stereovision [J]. *Modern Computer*, 2015(2): 66-69.
陈强. 基于双目立体视觉的三维重建 [J]. *现代计算机(专业版)*, 2015(2): 66-69.
- [5] Li S M, Chen Y. A multiple-view 3D reconstruction approach based on binocular stereo vision [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2016, 44(6): 1041-1043, 1052.
李硕明, 陈越. 一种基于双目立体视觉的多视角三维重建方法 [J]. *计算机与数字工程*, 2016, 44(6): 1041-1043, 1052.
- [6] Liang G Z, Zhang Y M, Han Q, *et al.* A novel 3D-layered electrochemical-thermal coupled model strategy for the nail-penetration process simulation [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 342: 836-845.
- [7] Xu D C, Chen Z Y, Zhao S M. The stereo measurement based on smart phone's imaging [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(2): 73-76.
徐殿成, 陈智勇, 赵双明. 一种基于智能手机成像的立体量测方法 [J]. *测绘通报*, 2015(2): 73-76.
- [8] Huo C J, Zhang H, Deng X. The research and implement of the camera calibration [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2007, 23(5): 75-77.
霍长娟, 张桦, 邓熹. 几种摄像机标定方法的比较 [J]. *天津理工大学学报*, 2007, 23(5): 75-77.
- [9] Cheng M J, Shen X J, Xiao J J, *et al.* Three-dimensional calibration of fisheye camera based on laser scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0315001.
程梦娇, 申夏晶, 肖江剑, 等. 基于激光扫描的鱼眼相机三维标定方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0315001.
- [10] Chen B, Sun T Q, Liu A X. Influence of speckle noise on image registration based on feature point matching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121103.
陈波, 孙天齐, 刘爱新. 散斑噪声对基于特征点匹配的图像配准的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121103.
- [11] Bay H, Tuytelaars T, Gool L V. SURF: speeded up Robust features [C] // *European Conference on Computer Vision 2006*, May 7-13, 2006, Graz, Austria. Berlin: Springer, 2006, 3951: 404-417.
- [12] Ge P P, Chen Q, Gu Y H. Algorithm of remote sensing image matching based on Harris corner and SURF

- feature[J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(7): 2205-2208.
- 葛盼盼, 陈强, 顾一禾. 基于 Harris 角点和 SURF 特征的遥感图像匹配算法[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(7): 2205-2208.
- [13] Ni Y D, Wang C. Fast Surf object tracking based on window[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2014, 38(4): 27-32.
- 倪郁东, 王晨. 基于窗口的 Surf 目标跟踪[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(4): 27-32.
- [14] Li H Y, Xu T R, Zhang L X, *et al.* Multi-pose face correction and recognition based on affine transformation [J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(4): 1215-1219, 1228.
- 李海彦, 徐汀荣, 张立晓, 等. 基于仿射变换的多姿态人脸矫正和识别[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(4): 1215-1219, 1228.
- [15] Chen Y X, Sun Q S, Xu H Y, *et al.* Matching method of remote sensing images based on SURF algorithm and RANSAC algorithm [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science & Technology*, 2012, 6(9): 822-828.
- 陈艺虾, 孙权森, 徐焕宇, 等. SURF 算法和 RANSAC 算法相结合的遥感图像匹配方法[J]. *计算机科学与探索*, 2012, 6(9): 822-828.
- [16] Zhang P W, Jiang X Y, Lü J G, *et al.* 3D reconstruction algorithm based on Euclidean distance for binocular vision[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1166-1170.
- 张鹏炜, 蒋晓瑜, 吕家国, 等. 一种基于欧氏距离的双目视觉三维重建算法[J]. *激光与红外*, 2013, 43(10): 1166-1170.
- [17] Yu Z J, Ma K, Wang Z J, *et al.* Marker matching method with improved KLT algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020301.
- 于之靖, 马凯, 王志军, 等. 采用改进 KLT 算法的标志点匹配方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020301.