

## 基于IMU的3D扫描仪倾角标定方法

习绍杰 张宗华 高楠 孟召宗

### Calibration method of 3D scanner tilt angle based on IMU

XI Shaojie, ZHANG Zonghua, GAO Nan, MENG Zhaozong

引用本文:

习绍杰, 张宗华, 高楠, 等. 基于IMU的3D扫描仪倾角标定方法[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 291–297. DOI: 10.5768/JAO202243.0203003

XI Shaojie, ZHANG Zonghua, GAO Nan, et al. Calibration method of 3D scanner tilt angle based on IMU[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 291–297. DOI: 10.5768/JAO202243.0203003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203003>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [三维形貌柔性测量系统标定方法及验证](#)

Calibration and verification method for 3D shape flexible measurement system

应用光学. 2018, 39(3): 385–391 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0303003>

#### [单摄像机单投影仪结构光三维测量系统标定方法](#)

Calibration method for structured light 3D measurement system having single camera and single projector

应用光学. 2018, 39(2): 225–229 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0203003>

#### [放疗3D剂量验证系统中光场相机点扩散函数获取](#)

Point spread function acquisition of light field camera in 3D dose verification system for radiotherapy

应用光学. 2021, 42(1): 43–48 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101007>

#### [一种抗姿态与表情变化的三维人脸识别方法](#)

3D face recognition method against gesture and expression change

应用光学. 2018, 39(4): 491–499 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0402002>

#### [用于三维测量的快速相位解包裹算法](#)

Fast phase unwrapping algorithm for 3D measurement

应用光学. 2019, 40(2): 271–277 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0202005>

#### [集成成像大纵深物体的三维形貌获取技术](#)

3D shape acquisition technology of object with large depth based on integral imaging

应用光学. 2017, 38(4): 587–591 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0402002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082(2022)02-0291-07

# 基于 IMU 的 3D 扫描仪倾角标定方法

习绍杰, 张宗华, 高楠, 孟召宗

(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

**摘要:** 3D 扫描仪以精度高、速度快、自动处理、稳定性好等优势在场景三维重建、智能制造、自动驾驶、虚拟现实等领域得到了广泛的应用。目前 3D 扫描仪设备多是安装在三脚架上, 容易因为地面不平使得扫描仪的转轴和重力方向产生夹角, 最终导致拍摄出的全景图和点云倾斜, 成为影响三维重建精度的关键难题。针对该问题, 提出一种借助惯性测量单元标定 3D 扫描仪倾角的方法。该方法利用惯性测量单元输出的加速度信息, 通过一个面阵相机建立惯性测量单元和 3D 扫描仪的联系, 将惯性测量单元的加速度信息转到扫描仪的转轴上。利用该信息计算出扫描仪转轴与重力方向的夹角, 并将该倾角补偿到生成的全景图和点云中, 校正倾斜模型。通过实验对校正前后计算的角度进行对比, 实验结果证明倾角测量误差可以控制在  $0.5^\circ$  以内。并且经过标定后, 精度至少提升 20%, 验证了整个标定方法的可靠性和准确性。

**关键词:** 三维重建; 3D 扫描仪; 惯性测量单元; 倾角; 标定

中图分类号: TH741

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202243.0203003](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203003)

## Calibration method of 3D scanner tilt angle based on IMU

XI Shaojie, ZHANG Zonghua, GAO Nan, MENG Zhaozong

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** The 3D scanner has been widely used in 3D scene reconstruction, intelligent manufacturing, automatic driving, virtual reality and other fields due to its advantages of high accuracy, fast speed, automatic processing and good stability. At present, most 3D scanners are installed on tripods, which is easy to cause an angle between the rotation axis of the scanner and gravity direction due to uneven ground. Therefore, the panorama and point cloud are skewed, which is a key problem affecting the accuracy of 3D reconstruction. To solve this problem, a method to calibrate the tilt angle of 3D scanner by using inertial measurement unit (IMU) was proposed. The proposed method used the acceleration information output by IMU to establish the connection between IMU and 3D scanner through an area array camera. The acceleration information of IMU was transferred to the central axis of scanner. Using the transferred information to calculate the angle between the rotation axis of scanner and gravity direction, then compensating this tilt angle to the generated panorama and point cloud, and the skew model can be corrected. Through experiments to compare the calculated angles before and after the calibration, the experimental results show that the tilt angle measurement error can be controlled within  $0.5^\circ$ . And after calibration, the accuracy is increased by at least 20%, which verifies the reliability and accuracy of the entire calibration method.

**Key words:** 3D reconstruction; 3D scanner; inertial measurement unit; tilt angle; calibration

---

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-02-17

基金项目: 国家自然科学基金 (52075147)

作者简介: 习绍杰 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学检测技术研究。E-mail: [2812957835@qq.com](mailto:2812957835@qq.com)

通信作者: 张宗华 (1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析和三维生物测定等技术研究。E-mail: [zhzhang@hebut.edu.cn](mailto:zhzhang@hebut.edu.cn)

## 引言

三维 (three-dimensional, 3D) 描仪在场景三维重建、智能制造、自动驾驶、虚拟现实等领域得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。近几年对 3D 扫描仪的精度、速度、稳定性等方面的研究已经逐渐成熟。但是扫描过程中设备摆放倾斜问题还没有得到很好的解决, 会导致扫描仪的转轴与重力方向产生夹角, 造成所得到的三维数据倾斜, 影响三维重建效果。针对此问题, 已有的解决方法是安装水平仪<sup>[5]</sup>来检测设备是否倾斜。水平仪分为气泡水平仪和电子水平仪。气泡水平仪成本低, 依靠人眼定性观察, 因此存在测量精度低, 无法对倾斜的角度进行量化分析等缺点。刘玲设计了一种基于图像检测的电子水平仪, 以图像处理代替人工读数提高精度, 以电机驱动平台回转实现校准的自动化, 并利用移动终端显示检测数据<sup>[6]</sup>。但由于电子水平仪体积大, 无法固定在 3D 扫描仪上与其配合使用。吴量等人提出了一种带温度补偿的数字倾角测量系统<sup>[7]</sup>, 该系统可以达到较高的测量准确度, 但是该系统组成较为复杂, 不适合与 3D 扫描仪配合使用。惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 集成了 3 个单轴的加速度计和 3 个单轴的陀螺仪, 可自动获取角度和姿态信息, 自动确定扫描仪的倾角。加速度计检测物体在载体坐标体系的加速度信号, 而陀螺仪检测载体相对于导航坐标系的角速度信号, 测量物体在三维空间中的角速度和加速度, 并以此解算出物体的姿态。对 IMU 的精度影响最大的是系统误差<sup>[8-12]</sup>。根据 IMU 的误差模型<sup>[13]</sup>, 使用多位置法<sup>[14-16]</sup>校正 IMU 传感器。经过标定后, 得到 IMU 的各项误差参数, IMU 的输出经过补偿以后才可以使用。

针对已有方法无法定量化 3D 扫描仪位姿或者使扫描仪系统更加复杂的问题, 本文提出借助 IMU 标定 3D 扫描仪倾角的方法。由于无法直接标定 IMU 和 3D 扫描仪之间的位置关系, 该方法通过一个面阵相机建立二者之间的联系。首先利用 kalibr 工具箱标定 IMU 和相机之间的位置关系。然后标定相机和扫描仪转轴的位置关系, 从而得到 IMU 和扫描仪之间的位置关系。根据 IMU 的输出计算扫描仪的转轴与重力方向的夹角。接着设计了测量扫描仪转轴与重力方向真实夹角的实验, 并将系统标定前后计算出的角度与真实值进行比较。最后拍摄了模型进行验证, 证明了本方法的实用性和准确性。

## 1 基本原理

### 1.1 系统标定原理

3D 扫描仪是具有深度感知的精密扫描设备, 可以基于结构光技术完成空间信息和图像信息的全方位采集。3D 扫描仪设备多是安装在三脚架上, 其在进行旋转拍摄过程中, 容易因为地面不平或者三脚架摆放不规范导致旋转轴与重力方向产生夹角, 如图 1 所示。

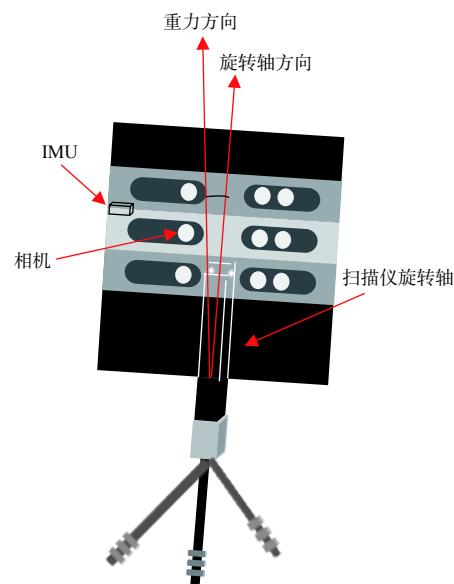


图 1 3D 扫描仪结构图

Fig. 1 Structure diagram of 3D scanner

由于 IMU 无法与旋转轴建立直接的联系, 本文借助 IMU 标定旋转轴与重力之间的夹角, 采用一个面阵相机建立二者之间的联系。标定后的 IMU 输出的加速度信息通过旋转矩阵转移到旋转轴上, 即可以计算出与重力方向的夹角。

### 1.2 IMU-相机位置关系校准原理

IMU-相机位置关系的校准使用开源的 kalibr 工具箱。kalibr 主要用来对视觉惯性传感器进行 IMU 和相机的时空标定, 得到 IMU 和相机之间的旋转矩阵。

用内嵌有 IMU 的扫描仪对标定板进行拍摄。根据相机的内参, 可以得到每一帧图像和相机之间的外参矩阵  $R$  和平移向量  $T$ 。将这些离散的矩阵参数化为六维列向量, 并使用 3 次样条插值构成连续的曲线。将  $R$  转化为轴角并对时间求导, 可以得到任何时刻的轴角变化率, 即相机在任何时刻相对标定板的角速度。而 IMU 的陀螺仪测量的就是相对标定板的角速度。相机和 IMU 由于在

同一个刚体上, 所以它们的角速度的模长相等, 相差一个旋转矩阵, 可以表示为

$$\omega_{ii} = \mathbf{R}_{ci}\Phi_{ci} \quad (1)$$

式中:  $\omega_{ii}$  表示 IMU 相对标定板的角速度;  $\Phi_{ci}$  表示相机的角速度;  $\mathbf{R}_{ci}$  表示 IMU 和相机之间的旋转矩阵, 以此来构造最小化目标函数。

$$\mathbf{R}_{ci} = \arg \min \sum \mathbf{R}_{ci} \omega_c - \omega_m \quad (2)$$

式中:  $\omega_m$  为陀螺仪测量值, 从而获得 IMU 和相机之间的旋转矩阵。由于旋转矩阵无法进行比较, 将旋转矩阵转换为比较直观的轴角

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2} \right), r_{ij} \in \mathbf{R} \quad (3)$$

### 1.3 相机-旋转轴位置关系标定原理

将标定板固定, 用相机对标定板进行旋转拍摄, 得到一系列拍摄了部分的标定板照片。根据相机内参, 可以得到相机坐标系和标定板坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{cw}$  和平移向量  $\mathbf{T}_{cw}$ 。相机光心在相机坐标系下的坐标为  $(0, 0, 0)$ 。设在标定板坐标系下的坐标为  $(a, b, c)$ , 则二者的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \times \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (4)$$

则相机光心在标定板坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \times (-\mathbf{T}) \quad (5)$$

对光心坐标进行平面拟合和圆拟合, 得到光心坐标的拟合圆, 则可以求得在世界坐标系下的圆心坐标。世界坐标系、相机坐标系和转轴坐标系之间的关系如图 2 所示。

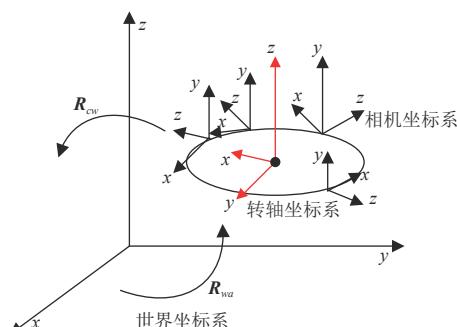


图 2 转轴标定原理图

Fig. 2 Schematic diagram of rotation axis calibration

世界坐标系为标定板坐标系,  $z$  轴垂直标定板向外。相机坐标系光轴垂直旋转轴向外, 设为  $z$  轴,  $x$  轴为沿切线方向,  $y$  轴由右手螺旋定理决定。假设光心坐标的拟合平面为

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (6)$$

求得拟合平面的单位法向量。设法向量方向为转轴坐标系的  $z$  轴,  $x$  轴平行于相机坐标系的  $z$  轴,  $y$  轴由右手螺旋定理决定。

世界坐标系下的转轴坐标系的基向量已知, 则可根据旋转矩阵定理得到世界坐标系和转轴坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{wa}$ 。由  $\mathbf{R}_{cw}$  与  $\mathbf{R}_{aw}$  得到相机坐标系和转轴坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{ca}$ 。

借助 IMU 计算扫描仪倾角的框图如图 3 所示。

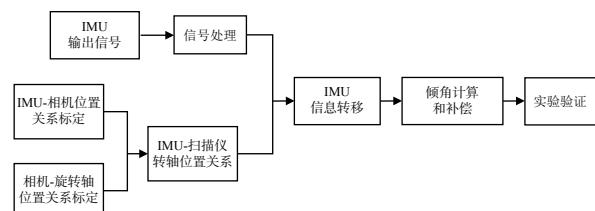


图 3 倾角计算框图

Fig. 3 Block diagram of tilt angle calculation

## 2 实验

为了验证本文的标定方法, 对各个步骤搭建了实验平台。按上述各步的方法分别对每一步进行了实验, 并对结果进行了分析。

### 2.1 IMU-相机外参标定实验

在进行外参标定实验时, 选用精度高并且可以提供序号信息的 aprilgird 标定板<sup>[17]</sup>。该标定板在部分遮挡情况下仍能够进行校准, 并且能够防止姿态计算时出现跳跃。

将经过校正的 IMU 输出, 以及拍摄的标定板照片作为输入, 传入 kalibr 工具箱中进行标定。标定结果为 IMU-扫描仪的相机之间的旋转矩阵。根据公式(3)将旋转矩阵转换为轴角。经过 30 次标定实验, 结果稳定在一个理想的范围之内, 如图 4 所示。

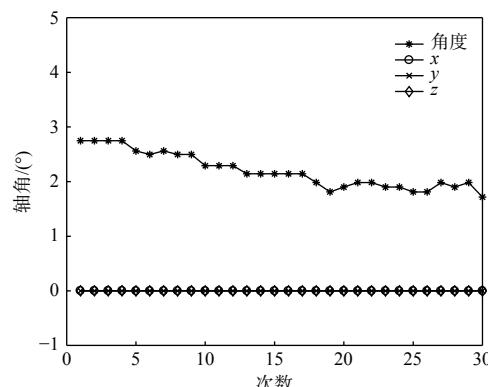


图 4 标定结果图

Fig. 4 Diagram of calibration results

由图 4 可知, 经过 30 次实验后, 旋转轴的 3 个分量基本趋于稳定, 绕轴旋转的角度稳定在 2 度左右。对 30 次结果求平均, 得到相机和 IMU 之间的旋转矩阵。

$$\mathbf{R}_{ci} = \begin{bmatrix} 0.9993 & -0.0238 & 0.0239 \\ 0.0237 & 0.9995 & 0.0029 \\ -0.0238 & -0.0023 & 0.9996 \end{bmatrix} \quad (7)$$

## 2.2 相机-旋转轴外参标定实验

旋转轴标定实验平台如图 5 所示。为了验证此方法与拍摄角度和拍摄距离无关, 进行了 3 组实验。

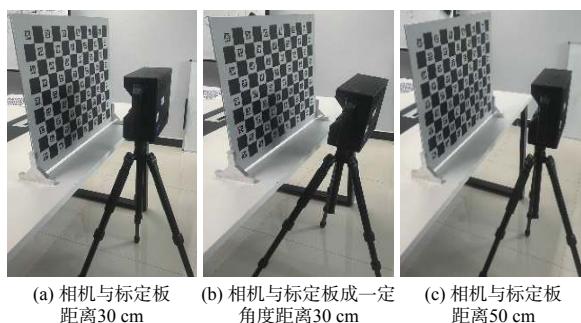


图 5 旋转轴标定实验

Fig. 5 Experiment of rotation axis calibration

对标定板进行扫描拍摄, 相机每旋转 3° 拍摄一张照片, 得到 60 张图片。相机的光心坐标拟合圆如图 6 所示。

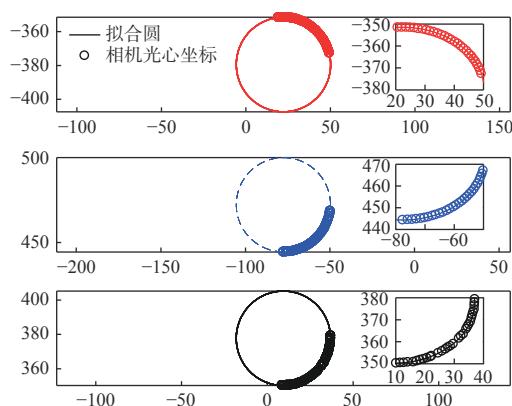


图 6 相机光心的拟合圆

Fig. 6 Fitting circle of camera optical center

由图 6 可看出相机光心都在圆上, 证明了  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$  的准确性。

再通过旋转矩阵定理计算相机到转轴的旋转矩阵, 得到 3 组实验结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 旋转矩阵转为轴角之后, 3 次实验的误差范围均控制在 1° 左右, 和扫描仪结构值一致。对 3 次实验的结果求平均值作为相机

与旋转轴之间的旋转矩阵。

$$\begin{bmatrix} 0.9998 & -0.0194 & 0.0028 \\ 0.0195 & 0.9998 & -0.0029 \\ -0.0027 & 0.0032 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (8)$$

表 1 旋转矩阵与轴角

Table 1 Rotation matrix and axial angle

名称	旋转矩阵 $\mathbf{R}$	轴角/°
30 cm	$\begin{bmatrix} 0.9998 & -0.0184 & 0.0031 \\ 0.0185 & 0.9998 & -0.0037 \\ -0.0030 & 0.0037 & 1.0000 \end{bmatrix}$	1.15
30 cm (倾斜)	$\begin{bmatrix} 0.9998 & -0.0202 & 0.0026 \\ 0.0202 & 0.9998 & -0.0028 \\ -0.0026 & 0.0029 & 1.0000 \end{bmatrix}$	1.18
50 cm	$\begin{bmatrix} 0.9998 & -0.0197 & 0.0024 \\ 0.0197 & 0.9998 & -0.0023 \\ -0.0024 & 0.0030 & 1.0000 \end{bmatrix}$	1.15

## 2.3 实验验证

为了验证标定结果的准确性, 设计了如图 7 所示的实验。将标定板悬挂于固定平台之上, 并旋转不同的角度。用倾斜一定角度的扫描仪对标定板进行拍摄。2 个标定板平面的交线即为相机坐标系下的重力线。根据重力线建立重力坐标系, 即可求出相机坐标系和重力坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}_2$ 。而相机坐标系和转轴坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}_1$  已知, 即可求出转轴坐标系和重力坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}$ 。



图 7 角度测量实物图

Fig. 7 Physical figure of angle measurement

将此实验求得的旋转矩阵转化的欧拉角当作真值, 与 IMU 计算的转轴的倾斜角度比较。经过 5 次实验, 结果如表 2 所示。

由表 2 可知, IMU 原始数据计算得到的倾斜角度误差很大。而 IMU 经过标定后, 再将 IMU 信息转移到旋转轴上。计算得到的角度与标定前相比, 精度至少提升 20%, 并且计算出的角度与测量角度之间的误差不超过 0.5°。

表 2 校正前后角度对比

Table 2 Angle comparison before and after calibration

次数	实验测得的角度/(°)	IMU原始数据计算的角度/(°)	经过标定后计算的角度/(°)	精度提升/%
1	6.03	8.17	6.52	20
2	7.46	10.03	7.58	24
3	7.69	10.52	7.51	28
4	9.50	15.13	9.22	39
5	12.20	19.30	12.42	36

### 3 全景验证

将扫描仪倾斜一定的角度进行模型拍摄, 如图 8 所示, 得到倾斜模型。并利用本文方法将扫描仪输出的 IMU 信息进行整理计算得到此倾角为  $8.56^\circ$ 。



图 8 倾斜的扫描仪

Fig. 8 Tilted scanner

将 IMU 计算出的倾角补偿到倾斜的模型, 得到校准后的模型, 补偿前后的点云和全景图对比如图 9 和图 10 所示。图 9 中颜色较浅的(a)是补偿前的点云; 颜色较深的(b)是补偿后的点云。

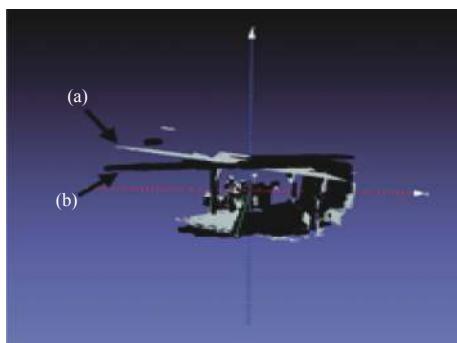


图 9 点云补偿前后对比图

Fig. 9 Comparison diagram before and after point cloud compensation



(a) 补偿前



(b) 补偿后

图 10 全景图补偿前后对比图

Fig. 10 Comparison diagram before and after compensation of panorama

在图 9 中可利用 Meshlab 工具测得补偿后的模型与补偿前的夹角为  $8.03^\circ$ , 则误差为  $0.53^\circ$ , 小于  $1^\circ$ 。补偿前部分数据较水平方向有一定的倾斜, 而补偿后该部分数据较水平方向倾斜程度明显减小, 经过补偿的点云得到了很好的校正。具体的校正角度对比如表 3 所示。

表 3 点云校正前后倾角对比

Table 3 Tilt angle comparison before and after point cloud correction

本文方法测得的倾角/(°)	补偿前后夹角/(°)	误差/(°)
8.56	8.03	0.53

由表 3 可知, 本文方法可以将倾斜一定角度的扫描仪拍摄出的倾斜模型校正, 并且校正误差不超过  $1^\circ$ 。

由图 10 可知, 补偿后地面相比补偿前更加水平, 经过补偿的全景图得到了很好的校正。

综上, 本文提出的方法对扫描仪倾斜问题进行了有效的补偿。

### 4 结论

本文提出在 3D 扫描仪中加入 IMU 精确定扫描仪倾角的方法。首先根据 IMU 的误差模型对 IMU 进行误差的校正和补偿。标定 IMU-相机的位置关系后, 提出了相机与扫描仪转轴之间位置关系的标定方法, 该方法的角度误差在  $1^\circ$  左右, 与扫描仪结构值一致。然后设计实验对扫描仪转轴与重力方向的真实夹角进行测量, 与 IMU 计算

的倾角进行对比,实验结果表明该方法的测量精度可以达到 $0.5^\circ$ ,验证了所提出方法的准确性。最后进行了全景验证。实验结果证明当地面不平、三脚架倾斜等因素使扫描仪倾斜时,可以实现自动校正并得到准确的三维模型。

随着大场景三维重建技术的飞速发展,3D 扫描仪的应用场景越来越广泛。本文提出的 3D 扫描仪倾角标定方法可以自动实现倾角校正并得到准确的三维模型,具有广泛的应用价值。

### 参考文献:

- [1] 龚海强,单奇,吴鹏飞,等.激光扫描在工件表面检测中的应用方法[J].*应用光学*,2019,40(4):686-691.  
GONG Haiqiang, SAHN Qi, WU Pengfei, et al. Application of laser scanning in workpiece surface testing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(4): 686-691.
- [2] YUTA O, YASUHIRO I, EIJI G. Monitoring the growth and yield of fruit vegetables in a greenhouse using a three-dimensional scanner[J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5270.
- [3] 张明,王铉,陈柯颖.基于激光雷达的室内场景三维重建系统设计[J].*电子设计工程*,2019,27(24):181-184.  
ZHANG Ming, WANG Xuan, CHEN Keying. Design of 3D reconstruction system for indoor environment based on lidar[J]. *Electronic Design Engineering*, 2019, 27(24): 181-184.
- [4] 余乐文,战凯,张达.地下空间三维激光扫描等分辨率方法研究[J].*仪器仪表学报*,2018,39(1):68-74.  
YU Lewen, ZHAN Kai, ZHANG Da. Study on three-dimensional laser scanning and other resolution methods in underground space[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(1): 68-74.
- [5] 马浩慧,邢敏剑.水平仪的发展及应用[J].*计量技术*,2018(7):18-21.  
MA Haohui, XING Minjian. Development and application of the spirit horizontal instrument[J]. *Measurement Technique*, 2018(7): 18-21.
- [6] 刘玲.二维水准器的图像检测与水平仪开发[D].江苏:东南大学,2017.  
LIU Ling. Image detection and development of the two-dimensional gradiometer[D]. Jiangsu: Southeast University, 2017.
- [7] 吴量,王昊京,王建立,等.天文定位中倾角传感器的标定[J].*光子学报*,2017,46(9):179-186.  
WU Liang, WANG Haojing, WANG Jianli, et al. Calibration of inclinometer in celestial positioning system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(9): 179-186.
- [8] SARKKA O, NIEMINEN T, SUURINIEMI S, et al. A multi-position calibration method for consumer-grade accelerometers, gyroscopes, and magnetometers to field conditions[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(11): 3470-3481.
- [9] 赵桂玲,姜雨含,李松. IMU标定数学建模及误差分析[J].*传感技术学报*,2016,29(6):886-891.  
ZHAO Guiling, JIANG Yuhan, LI Song. The IMU calibration mathematical modeling and error analysis[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(6): 886-891.
- [10] 程为彬,陈烛姣,张夷非,等. IMU姿态误差均衡校正模型与验证[J].*仪器仪表学报*,2021,42(9):202-213.  
CHENG Weibin, CHEN Zhujiao, ZHANG Yifei, et al. Balance correction and verification of IMU posture error[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(9): 202-213.
- [11] DONG Chunmei, REN Shunqing, CHEN Xijun, et al. A separated calibration method for inertial measurement units mounted on three-axis turntables[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2846.
- [12] TEDALDI D, PRETTO A, MENEGATTI E. A robust and easy to implement method for IMU calibration without external equipments[C]. International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China: IEEE, 2014: 3042-3049.
- [13] 郭栓运,马忠孝,许开銮,等.捷联惯性导航系统误差工程化分析方法[J].*应用光学*,2014,35(6):927-932.  
GUO Shuanyun, MA Zhongxiao, XU Kailuan, et al. Engineering analysis method of strap-down inertial navigation system error[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(6): 927-932.
- [14] WANG Zihui, CHENG Xianghong, FU Jinbo. Optimized multi-position calibration method with nonlinear scale factor for inertial measurement units[J]. *Sensors*, 2019, 19(16): 3568.
- [15] 王坚,梁建,韩厚增.低成本IMU的多位置旋转现场标定方法[J].*中国惯性技术学报*,2017,25(3):294-298.  
WANG Jian, LIANG Jian, HAN Houzeng. Method for low-cost IMU in-field calibration through multi-position rotation[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(3): 294-298.
- [16] DING Zhijian, CAI Hong, YANG Huabo. An improved

multi-position calibration method for low cost micro-electro mechanical systems inertial measurement units[J].  
[Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering](#), 2015, 229(10): 1919-1930.

[ 17 ] 茹祥宇. 基于四旋翼飞行器平台多传感器融合的位姿估计方法研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2018.  
RU Xiangyu. Pose estimation of multi-sensor fusion for quadrotor systems[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2018.