

## 基于双自由度转台的全向空间单目视觉室内定位测量方法

吴军 王豪爽 单腾飞 郭润夏 张晓瑜 陈玖圣

### **Omnidirectional spatial monocular vision indoor localization measurement based on a two-degree-of-freedom rotary platform**

WU Jun, WANG Hao-shuang, SHAN Teng-fei, GUO Run-xia, ZHANG Xiao-yu, CHEN Jiu-sheng

引用本文:

吴军, 王豪爽, 单腾飞, 郭润夏, 张晓瑜, 陈玖圣. 基于双自由度转台的全向空间单目视觉室内定位测量方法[J]. *中国光学*, 2024, 17(3): 605–616. doi: 10.37188/CO.2023–0106

WU Jun, WANG Hao-shuang, SHAN Teng-fei, GUO Run-xia, ZHANG Xiao-yu, CHEN Jiu-sheng. Omnidirectional spatial monocular vision indoor localization measurement based on a two-degree-of-freedom rotary platform[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 605-616. doi: 10.37188/CO.2023-0106

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0106>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于正解过程的Risley棱镜光束指向控制精度分析

Analysis of beam steering control precision for Risley prisms based on forward solution  
*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(4): 507 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0507>

#### 室内人体隐匿物被动太赫兹成像研究进展

Overview of passive terahertz imaging systems for indoor concealed detection  
*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(1): 114 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0114>

#### 光学自由曲面面形检测技术

Optical free-form surfaces testing technologies  
*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(3): 283 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0283>

#### 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统

Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating  
*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(1): 39 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0039>

#### 折反射周视系统研究进展与展望

Research progress and prospect of catadioptric panoramic system  
*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(5): 681 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0681>

#### 太赫兹偏振测量系统及其应用

Polarization sensitive terahertz measurements and applications  
*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(1): 98 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0098>

文章编号 2097-1842(2024)03-0605-12

## 基于双自由度转台的全向空间单目视觉 室内定位测量方法

吴军<sup>1\*</sup>, 王豪爽<sup>1</sup>, 单腾飞<sup>1</sup>, 郭润夏<sup>2</sup>, 张晓瑜<sup>2</sup>, 陈玖圣<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;

2. 中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300)

**摘要:**针对传统单目视觉测量系统测量视场有限的问题, 本文提出一种基于双自由度旋转平台的全向空间单目视觉测量方法。首先, 对双自由度旋转平台的转轴参数进行标定, 用副相机拍摄固定在双自由度转台上的棋盘格标定板, 提取棋盘格角点的位置坐标, 并将其转化到同一相机坐标系下。利用PCA(主成分分析)平面拟合得到初始位置转轴参数中的方向向量, 使用空间最小二乘圆拟合方法得到初始位置下转轴参数中的位置参数。然后, 通过转台转动的角度以及罗德里格斯公式将不同位置下相机获取的数据进行坐标系统一, 实现水平和竖直方向全向空间下的目标测量。最后, 通过高精度激光测距仪验证了本方法的测量精度, 并通过与双目视觉测量系统、wMPS测量系统进行比对实验, 验证了本方法的全向空间测量能力。实验结果表明, 本方法测量精度基本达到双目视觉测量系统水平, 但测量范围远大于双目视觉测量, 可以满足全向空间测量要求。

**关键词:** 双自由度转台; 单目视觉; 全向空间测量; 室内定位

中图分类号: TB96

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0106

## Omnidirectional spatial monocular vision indoor localization measurement based on a two-degree-of-freedom rotary platform

WU Jun<sup>1\*</sup>, WANG Hao-shuang<sup>1</sup>, SHAN Teng-fei<sup>1</sup>, GUO Run-xia<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-yu<sup>2</sup>, CHEN Jiu-sheng<sup>2</sup>

(1. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation

University of China, Tianjin 300300, China)

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

**Abstract:** To address the problem of limited field of view measurement in traditional monocular vision measurement systems, we propose an omnidirectional spatial monocular vision measurement method based on a two-degree-of-freedom rotary platform. First, the rotating axis parameters of the double-degree-of-freedom

收稿日期: 2023-06-21; 修订日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52375557, No. 52005500, No. 62173331); 中央高校基本科研业务费高水平成果培育专项(No. 3122023PY06, No. 3122023044)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52375557, No. 52005500, No. 62173331);  
Special Project for the Cultivation of High-Level Achievements in the Basic Scientific Research Business  
Funds of Central Universities (No. 3122023PY06, No. 3122023044)

rotary platform are calibrated. Then, the pictures of the checkerboard calibration plate fixed with the two-degree-of-freedom rotary platform are captured by using an auxiliary camera. Position coordinates of the checkerboard corner points are extracted and converted to the same camera coordinate system. The direction vector of the rotating axis parameters in the initial position is obtained through PCA (principal component analysis) plane fitting, and the position parameter of the rotating axis parameters in the initial position is determined using the method of spatial least squares circle fitting. The camera data acquired at various angles is transformed into the same coordinate system using the rotation angle of the rotary platform and the Rodrigues formula. This enables measurement of the target in the horizontal and vertical omnidirectional space. Finally, the measurement accuracy of the proposed method is verified using a high-precision laser rangefinder. Additionally, experiments comparing the omnidirectional spatial measurement ability of the proposed method with the binocular vision measurement system and wMPS measurement system are conducted. The results indicate that the method achieves a measurement accuracy comparable to that of a binocular vision system. However, it also surpasses the binocular vision system in term of measurement range, making it applicable for omnidirectional spatial measurements.

**Key words:** two-degree-of-freedom rotary platform; monocular vision; omnidirectional spatial measurement; indoor positioning

## 1 引言

室内定位测量技术广泛应用于工业制造领域,如大型飞机、大型轮船的大部件装配<sup>[1]</sup>。由于建筑物材料的屏蔽效应,传统的全球卫星导航系统无法直接应用于室内定位,因此迫切需要研发高精度、大测量范围、便携式的室内定位方法<sup>[2-4]</sup>。

目前最普遍的室内定位测量技术主要有基于 WiFi 信号、基于蓝牙信号等的网络式定位技术<sup>[5]</sup>,国内多家单位致力于研究基于 WiFi 信号的室内测量定位方法<sup>[6]</sup>,并提出了一种节省成本的方法用以进行精度提升和优化<sup>[7]</sup>。该方法主要是建立一种运用众包数据技术的定位方法来进行室内测量定位,可以在建库方面节约成本。文献<sup>[8]</sup>提出建立梯度指纹库的方法。与 WiFi 测量定位原理相同,蓝牙测量定位方法的研究目前也有不少,文献<sup>[9]</sup>提出了一种对蓝牙信号进行自动适应的定位算法。该算法可以更好地适应不稳定的蓝牙信号,但是这些定位方法的测量精度较低。基于 UWB 定位系统采用冲击脉冲产生超宽带信号进行室内定位<sup>[10]</sup>,具有低功耗、测距精度

高等优点。然而该系统三维定位困难,定位精度低。基于旋转激光扫描技术的三维坐标测量方法可以更精确地进行空间定位<sup>[11-13]</sup>。该方法由旋转激光发射器和与多个光电接收器集成的探针实现。这种方法测量精度高,而且量程可拓展,但是所需的部署成本高,标定繁琐,便携性差。

上述室内定位方法均需组建测量网络,使用前需要进行复杂的标定过程。为增加定位系统的便携性,在上述测量系统基础上又发展出大量单站式室内定位系统,如激光测距仪<sup>[14]</sup>、全站仪<sup>[15]</sup>、wMPS 单基站测量<sup>[16]</sup>等。其中,激光跟踪仪是利用激光对动态目标进行自动连续跟踪的技术,该系统造价昂贵,操作过程对激光光路的连续性有着严苛要求,且无法实现多目标同步测量。全站仪是一种集光、机、电为一体的高技术测量仪器,该系统测量量程大,一般应用于室外工程环境,测量过程需人为瞄准,自动化程度较差。wMPS 单基站测量具有较高的精度,也可实现多目标同步测量,但其相对测量精度较低,易产生测量盲区,对环境条件要求较高。

相对于前述定位技术,视觉测量是一种有效的空间位置感知视觉测量方法,具备高精度、经济性、便携性、多任务同步处理的优点。双目视

觉技术测量精度较高,且由于提前标定了两相机的相对位置参数,可对空间单个特征点进行测量。但由于需提前标定两相机位置<sup>[17-19]</sup>,且一旦标定后两相机的位置不可再变动,故其测量灵活性受到极大地限制,且测量视场必须位于相机的公共区间,无法实现全向空间测量。基于单目视觉的测量系统具有较好的便携性,但是图像边缘的畸变对测量结果影响较大,而且相机的视场测量范围同样较小,无法满足全向空间的视觉测量<sup>[20]</sup>。

本文提出了一种基于双自由度转台的单目视觉测量系统,主要借鉴了通过双自由度转台确定相机及其测量关系的思路。首先通过对棋盘格的标定拟合出两个轴的参数信息,利用转轴参数和罗德里格斯公式<sup>[21-23]</sup>以及转台转动角度进行计算,并找到初始位置相机的相机坐标系与转动一定角度后的相机坐标系之间的刚性变换关系。最后将靶标图像作为输入信息,通过使用 PnP (Perspective-n-Point) 算法<sup>[24-26]</sup>可以得到在转台相机坐标系下不同位置靶标的坐标点,利用相机坐标系的刚性变换关系将目标点转换到同一坐标系下,从而得到靶标在空间中的任意位置在转台坐标系下的三维坐标,从而实现全向空间的单目视觉测量。

## 2 基于双自由度旋转平台的全向空间单目视觉测量系统结构及数学模型

### 2.1 基于双自由度旋转平台的全向空间单目视觉测量系统结构

基于双自由度旋转转台的全空间圆形标定板单目视觉测量系统结构如图1所示。该系统包括工业 CCD 相机、测量靶标、双自由度旋转转台等。相机固定在双自由度旋转转台上,根据转台控制台的水平轴和竖直轴的转动度数,得到相机的旋转矩阵。

PnP 算法是一种利用余弦定理进行 3D 到 2D 点对运动求解的方法。该方法可以通过采集测量靶标的图像以及相机内参,利用靶标的世界坐标和图像的像素坐标,解算出测量靶标上目标点在相机坐标系中的三维坐标。

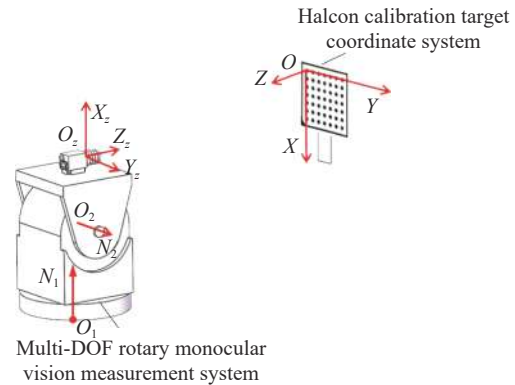


图1 测量系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of measurement system

根据转台的两个转轴的转轴参数  $N_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $O_2$ , 以及测得的转台角度  $\alpha$ 、 $\beta$ , 运用刚体运动原理将得到的目标点在相机坐标系下的三维坐标从该位置的相机坐标系  $O-xyz$  转换至转台初始位置的相机坐标系  $O_z-X_zY_zZ_z$  下, 从而完成目标在旋转平台相机系统下的坐标测量。

### 2.2 基于双自由度旋转平台的全向空间单目视觉测量系统数学模型

如图2所示,在制造和装配过程中,转台由于各种原因会不可避免地产生装配误差,导致测量时,转台的转轴不能精确地垂直和水平,且相机的光心不能够准确地位于转轴上。因此,在使用测量前,应检查相机各旋转轴的方向并对各转轴的初始位置进行准确标定,为后续的目标测量、统一坐标系做准备,从而实现全向空间测量。

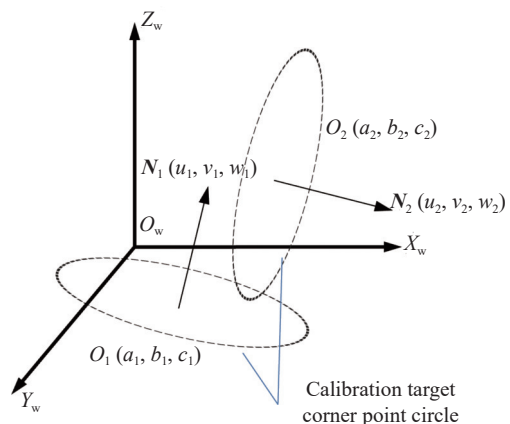


图2 转台转轴原理图

Fig. 2 Schematic diagram of rotary platform's rotating axis

各个转轴的初始位置参数精确标定算法将在第3节进行介绍。

如图 2 所示, 设置双自由度转台的初始位置, 对该位置的转轴参数进行标定, 水平方向转轴的方向向量和转轴位置坐标可以通过  $N_1(u_1 \ v_1 \ w_1)$ 、 $O_1(a_1 \ b_1 \ c_1)$  来表示, 而初始位置时竖直方向转轴的参数为  $N_2(u_2 \ v_2 \ w_2)$ 、

$O_2(a_2 \ b_2 \ c_2)$ 。由于相机光心并不与旋转轴重合, 随着转轴的转动, 转台上的相机相对于初始位置会发生刚性移动, 保持竖直方向转轴不动, 水平方向转动  $\alpha$  角, 相机发生刚性移动所产生的旋转矩阵和平移向量为:

$$\mathbf{R}(\alpha) = \begin{bmatrix} u^2 + (v^2 + w^2) \cos \alpha & uv(1 - \cos \alpha) - w \sin \alpha & uw(1 - \cos \alpha) + v \sin \alpha \\ uv(1 - \cos \alpha) + w \sin \alpha & v^2 + (u^2 + w^2) \cos \alpha & vw(1 - \cos \alpha) - u \sin \alpha \\ uw(1 - \cos \alpha) - v \sin \alpha & vw(1 - \cos \alpha) - u \sin \alpha & w^2 + (u^2 + v^2) \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{T}(\alpha) = \begin{bmatrix} (a_1(v_1^2 + w_1^2) - u_1(b_1 v_1 - c_1 w_1))(1 - \cos \alpha) + (b_1 w_1 - c_1 v_1) \sin \alpha \\ (b_1(u_1^2 + w_1^2) - v_1(a_1 u_1 - c_1 w_1))(1 - \cos \alpha) + (c_1 u_1 - a_1 w_1) \sin \alpha \\ (c_1(u_1^2 + v_1^2) - w_1(a_1 u_1 - b_1 v_1))(1 - \cos \alpha) + (a_1 v_1 - b_1 u_1) \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (2)$$

随着水平方向转动, 竖直方向的转轴参数 (方向向量、转轴位置) 随着  $\alpha$  改变。  $N'_2, O'_2$  为竖直方向转轴初始位置参数  $N_2, O_2$  绕水平轴转动  $\alpha$  角后的转轴参数, 所以竖直方向转轴是随着  $\alpha$  角的变化而有所变动。 竖直方向转轴相对于初始位置的转轴参数为  $N'_2(u'_2, v'_2, w'_2)$ 、 $O'_2(a'_2, b'_2, c'_2)$  表示如下:

$$N'_2 = \begin{bmatrix} u'_2 \\ v'_2 \\ w'_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\alpha) \times \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$O'_2 = \begin{bmatrix} u'_2 \\ v'_2 \\ w'_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\alpha) \times \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} + \mathbf{T}(\alpha). \quad (4)$$

当转台相机绕竖直转轴旋转  $\beta$  角后, 相机相对于初始位置的旋转矩阵  $\mathbf{R}(\beta)$  与平移向量  $\mathbf{T}(\beta)$  可通过将旋转角  $\beta$  角、 $N'_2$  和  $O'_2$  代入式 (1)、式 (2) 得到。

根据旋转角度  $\alpha, \beta$  和式 (1)~式 (4) 计算出旋转前后的转换矩阵和平移向量, 即可将旋转后的测量数据转换到旋转前的相机坐标系下, 从而完成全向空间的三维坐标测量工作。整体流程图如图 3 所示。

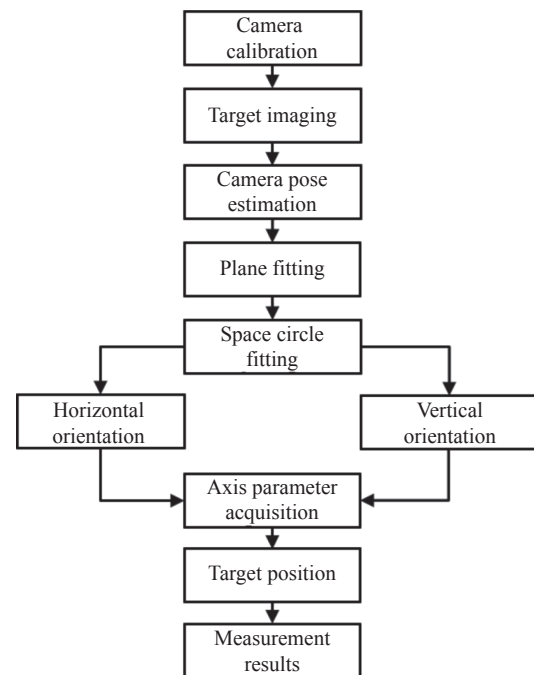


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

### 3 双自由度转台转轴参数标定方法

转台转轴参数包括水平方向转轴的方向向量和位置坐标, 以及初始位置时竖直方向转轴的方向向量和位置坐标。由于在进行全空间测量过程中, 需要将转台上相机在各个位置下测得的三维坐标转换至同一坐标系下。现设定转台某一位置为初始位置, 对转台各个轴的方向向量以及初始

位置的转轴位置进行标定。

首先,对实验中参与转轴标定的相机进行内参( $K$ 和 $D$ )标定,其中 $K$ 为相机的内参矩阵, $D$ 为相机的畸变矩阵,内参标定运用的方法是张正友标定法<sup>[27]</sup>。

然后,将棋盘格标定板固定在双自由度转台上,使标定板与主相机的位置相对固定,固定副相机位置,使副相机与转台基座位置固定。如图4所示。其中位于中间且固定在转台上的相机为主相机,用于系统中目标图像输入。由于相机视场有限,转台转动一圈,相机不能拍到标定板跟随转台绕一整圈的完整图像。为了提高参数的标定精度,本文使用多相机进行环绕拍摄。通过调整相机与转台的距离,使用4个相机刚好能使任意位置下的棋盘格标定板始终处于一个及以上的相机视场内,且被清晰拍摄。4个副相机编号为①、②、③、④。固定竖直方向转轴,使转台仅在水平方向转动,使用副相机对固定在转台上的棋盘格标定板拍照,利用采集到的图片,计算出副相机坐标系下棋盘格标定板上同一角点的位置坐标。同理,通过固定水平方向,不断的绕竖直转轴旋转,得到在副相机坐标系下棋盘格同一角点的位置坐标。得到的位置坐标用于下面对转台初始位置的各个转轴参数的拟合。

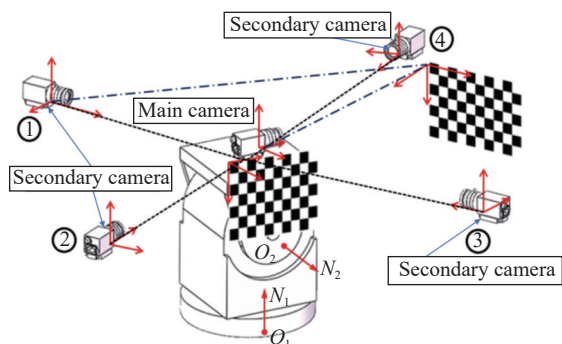


图4 转轴参数标定原理图

Fig. 4 Schematic diagram for the calibration of the rotating axis parameters

图中 $O_1$ 、 $N_1$ 为水平方向转轴的转轴参数, $O_2$ 、 $N_2$ 为初始位置时竖直方向转轴的转轴参数,通过相邻两个副相机之间的 $\begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix}$ 关系,对上面得到的角点位置坐标进行转换,使上述参数统一到副相机①的相机坐标系中,其中 $R_{11}T_{11}$ 、 $R_{21}T_{21} \dots R_{n1}T_{n1}$ ,  $R_{12}T_{12}$ 、 $R_{22}T_{22} \dots R_{n2}T_{n2}$ 为在副相机①相机坐标系下棋盘格角点在不同位置时的位

置坐标,其中包括旋转矩阵( $R$ )和平移向量( $T$ )。

利用标定板不同位置数据,以及相机拍摄到的棋盘格标定板的像素坐标与标定板的世界坐标之间的单应性关系,计算获得图4中 $R_{11}T_{11}$ 、 $R_{21}T_{21} \dots R_{n1}T_{n1}$ ,最终得到世界坐标系与相机坐标系在各个角度下的关系。不同位置副相机测得的棋盘格角点数据可以通过相机之间的位置关系以及相机外参转换到同一坐标系,从而得到坐标系下同一个棋盘格角点绕转轴旋转时各个位置的位置数据,计算出标定板在各个位置相对于初始位置的位姿:

$$\begin{cases} R_{ii} = R_i \times R_1^{-1} \\ T_{ii} = T_i - R_i R_1^{-1} T_1 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $R_{i1}$ 、 $R_{ii}$ 、 $T_{i1}$ 、 $T_{ii}$ 分别为棋盘格标定板在第 $i$ 个位置时相对于最初位置的旋转矩阵和平移向量。该平移向量可以作为在第 $i$ 个位置时棋盘格标定板角点的三维坐标。

### 3.1 水平方向转轴方向向量计算

转台转轴在安装过程中难免会存在一定的误差,如图2所示,水平方向转轴与竖直方向转轴可能会有一定的夹角。转轴参数的准确性会影响测量的结果,所以需要进行转轴标定。

如图4所示,将棋盘格标定板固定在转台上,可通过4个副相机对旋转标定板进行标定,获得转台参数。固定竖直方向,使转轴绕水平方向转动,棋盘格标定板在不同位置处,在副相机坐标系下,可以通过棋盘格角点的三维坐标拟合出空间平面,得到该空间平面的法向量,作为转轴的方向向量。

本文使用PCA(主成分分析)<sup>[28-29]</sup>对棋盘格标定板的角点做平面拟合<sup>[30]</sup>,计算拟合平面的法向量。转轴与该平面互相垂直,从而得到转轴的方向向量,这种方法降低了噪声点的影响。该方法的主要作用是对三维点进行降维,具有相对较好的鲁棒性。

由于副相机的视场有限,仅限于转台转轴转动一定角度,且拟合所用的点过于集中,会带来不必要的拟合误差,所以,采用多相机环绕拍摄,如图4所示。标定板绕转轴旋转一周,将棋盘格角点在不同位置的点坐标转换至副相机①坐标系下,可以得到棋盘格角点绕水平方向转轴转动时的所有点坐标,有效减小拟合误差。

### 3.2 基于水平方向转动轴的竖直方向转动轴方向向量

同理, 固定水平方向转轴与一定位置作为初始位置, 转动竖直方向转轴, 即可测出竖直方向转轴初始方向向量。

由于所用转台水平方向转轴与竖直方向转轴互相垂直, 且位置相对不变, 当水平方向转动时, 竖直方向转轴的转轴参数也会随之发生变化, 所以, 在这里需要设定水平方向转轴的初始位置。

以转台水平方向角度为  $0^\circ$  时的位置作为初始位置。保持水平方向转轴固定, 转动竖直方向转轴, 同样使用副相机进行拍摄, 得到副相机坐标系中棋盘格角点在不同位置时的位置坐标。再通过平面拟合得到空间拟合平面, 计算得到平面的法向量作为转台竖直方向转轴在初始位置时的方向向量。

### 3.3 水平方向转轴位置坐标计算

在转台转动时, 与转台相固定的相机也随之转动, 相机坐标系也会随着转台发生刚性移动, 相机坐标系在移动前后的位置关系可以通过转换矩阵 ( $\mathbf{R}$ ) 和平移向量 ( $\mathbf{T}$ ) 来表示。移动前后的位置关系可以通过罗德里格斯公式进行计算。首先需要得到转轴的方向向量及位置坐标。棋盘格标定板与转台相对固定, 当转台转动时, 棋盘格上的同一个角点也绕转轴转动, 不同位置的角点可以拟合出一个空间圆, 角点所在的空间平面与转轴相交于一点, 该点为拟合出的空间圆的圆心。本文通过对绕转轴转动的棋盘格角点进行三维空间圆拟合<sup>[31]</sup>, 得到空间圆圆心, 将其作为转轴的位置坐标来确定转台转轴的位置。

建立方程  $u_1x + v_1y + w_1z + d = 0$  作为棋盘格角点的拟合平面方程,  $\mathbf{N}_2 = (u_1, v_1, w_1)$  作为该平面的方向向量。将不同位置的棋盘格角点的三维坐标  $(x, y, z)$  投影到拟合平面上, 得到其投影点  $(x', y', z')$ , 其中:

$$\begin{cases} x'_i = uk + x_i \\ y'_i = vk + y_i \\ z'_i = wk + z_i \end{cases}, \quad (6)$$

其中  $k = -ux_i - vy_i - wz_i - d$ 。对角点坐标进行二维化转换, 在拟合平面上进行平面元拟合。

建立平面坐标系,  $(x'_0, y'_0, z'_0)$  为角点坐标的

第一个投影点, 设该点为坐标系原点, 即  $X_0 = x'_0, Y_0 = y'_0, Z_0 = z'_0$ 。将坐标系原点到点  $(x'_1, y'_1, z'_1)$  的方向作为  $X$  轴的正方向,  $Z$  轴的正方向取投影平面垂直的方向, 即法向量方向。确定坐标系的两个轴, 便可得到  $Y$  轴的方向:

$$x_1 = x'_1 - x'_0, y_1 = y'_1 - y'_0, z_1 = z'_1 - z'_0$$

$$x_3 = u, y_3 = v, z_3 = w$$

$$x_2 = (-z_1 - y_1y_2)/x_1, y_2 = \frac{x_1x_3 - x_3z_1}{x_3y_1 - x_1z_3}, z_2 = 1.$$

假设三轴的单位向量分别为  $(n_{1x}, n_{2x}, n_{3x}), (n_{1y}, n_{2y}, n_{3y}), (n_{1z}, n_{2z}, n_{3z})$ , 则二维坐标到三维坐标的转换矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} n_{1x} & n_{2x} & n_{3x} & X_0 \\ n_{1y} & n_{2y} & n_{3y} & Y_0 \\ n_{1z} & n_{2z} & n_{3z} & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

相机的光心从三维坐标转换至二维坐标的转换矩阵为:  $\mathbf{H\_inv} = \mathbf{H}^{-1}$ 。

将三维光心点转化为二维点:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H\_inv} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将得到的二维坐标进行平面圆拟合, 其中拟合所需的目标函数为:

$$U = \sum_{i=0}^{N-1} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2]^2 = \min. \quad (9)$$

令  $\frac{\partial U}{\partial a} = \frac{\partial U}{\partial b} = 0$  可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial a} = -4 \sum \{[(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2](x_i - a)\} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial b} = -4 \sum \{[(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2](y_i - b)\} = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

对上式求解, 获得拟合平面上圆心的平面坐标, 利用转换矩阵  $\mathbf{H}$ , 将平面坐标转化为空间平面上空间圆的圆心坐标。

### 3.4 基于水平转动轴参数的竖直方向转动轴位置坐标计算

由于竖直方向转轴参数受水平方向转轴的位置影响, 所以先假定水平方向角度为  $0^\circ$  时的位置为初始位置, 同理用竖直方向转动的棋盘格

角点组成的点坐标拟合出平面方程,得到竖直方向上三维相机光心转化为二维坐标的转换矩阵: $H_{inv} = H^{-1}$ 。

通过式(8),将三维光心点转化为二维点。运用最小二乘法<sup>[32]</sup>及式(9)、式(10),将转化得到的二维点进行平面拟合,利用上文的转换矩阵 $H$ 即可得到所在平面上的三维圆心坐标。

## 4 实验结果与分析

本文搭建的基于双自由度转台的全向空间单目视觉测量系统如图5所示。整个实验系统主要由双自由度转台、棋盘格标定板、靶标、计算机以及工业相机组成。摄像机采用 Mind Vision,分辨率为 $2592 \times 1944$ ,镜头焦距为16 mm。

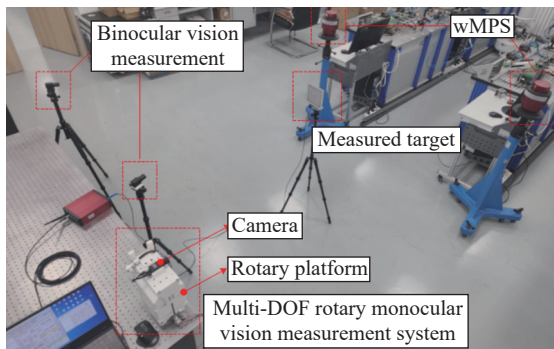


图5 全空间测量实验装置

Fig. 5 Full-space measurement experimental setup

图6中的圆形标定板为本文设计的测量靶标,标定板的尺寸为 $7 \times 7$ ,相邻圆形标志点的特征间距为15 mm。选取左上角、左下角、右上角、右下角4个标志点建立靶标坐标系,如图6所示。将左上角的标志点作为靶标坐标系的原点,而其他3个标志点的在靶标坐标系下的坐标分别为 $(45 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ ,  $(0 \text{ mm}, 45 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ ,  $(45 \text{ mm}, 45 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 。使用PnP算法,可以通过相机参数、靶标坐标系的实际坐标以及相机拍摄得到的像素坐标系下的像素坐标,得到靶标标志点在相机坐标系下的位置坐标,即靶标在测量空间中的位置。

图6中wMPS接收器安装在圆形标定板背面,便于wMPS系统的测量。wMPS接收器与圆形标定板相对固定,通过影像测量仪测量圆形标定板背面中心在板面上的二维坐标,将wMPS接

收器固定在圆形标定板背面中心处,测量接收器球心与圆形标定板的高度,确定wMPS接收器与圆形标定板之间的位置关系。

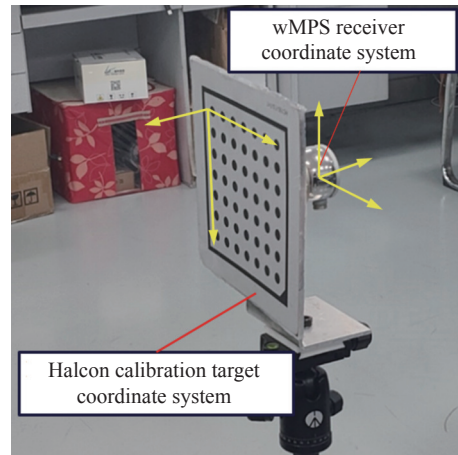


图6 wMPS与圆形标定板连接装置

Fig. 6 The connection device between wMPS and circular calibration plate

### 4.1 测量系统的标定

测量系统的标定包括转台两个转轴参数的标定,主要用4个副相机对转台上的棋盘格标定板进行拍摄,棋盘格标定板随着转台转动,拍摄标定板的不同姿态(如图7所示),得到标定板角点各个位置的坐标。随着转台转动,一个副相机无法拍摄到所有位置的标定板,将副相机拓展到4个,可以分别拍摄各个方向,并将各个相机得到的标定板角点坐标进行坐标系统一。

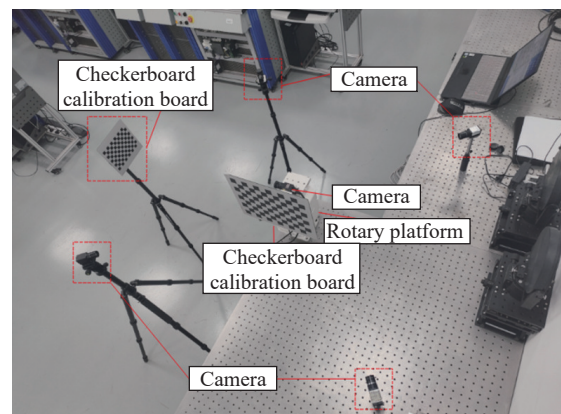


图7 转轴标定实验装置图

Fig. 7 Experimental setup for calibrating the rotating axis

将各个副相机坐标系下的位姿参数进行坐标系转换,转换至副相机①的相机坐标系下,得到图8的拟合结果。同理,得到竖直方向棋盘格标



定板原点绕转轴的位姿参数拟合结果,如图 9 所示。

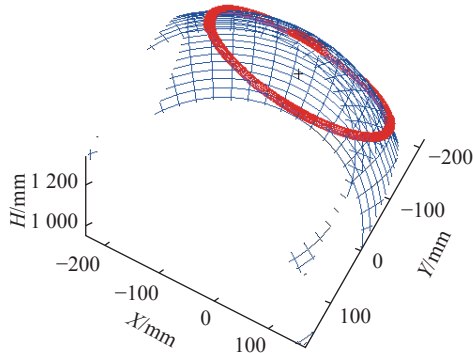


图 8 角点位姿转换坐标系后拟合结果

Fig. 8 Fitting result after transforming the corner point pose data to a coordinate system

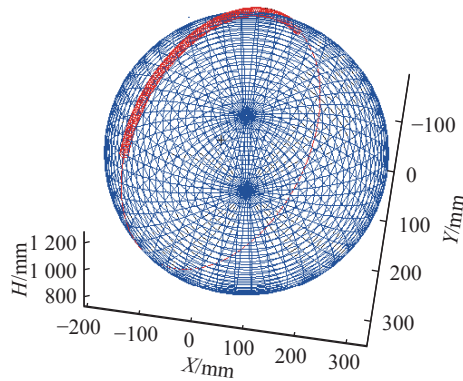


图 9 在初始位置垂直方向圆拟合结果

Fig. 9 Circle fitting result in the vertical direction at the initial position

首先,要对副相机进行内参和外参的标定,通过各个副相机以及转台相机的内外参数找到相机之间的转换关系以及副相机坐标系在主相机坐标系下的位置;然后,进行转轴标定实验,保持副相机固定不动,转台沿顺时针方向每转动 $1^\circ$ ,分别用副相机采集标定板图像。为了得到不同角度相机坐标系与世界坐标系的转换矩阵,可以根据棋盘格平面与像平面的单应性关系来计算。利用公式得到棋盘格标定板在第 $i$ 个位置时,相对于初始位置的转换矩阵 $R_{i1,j1}$ ,在主相机坐标系下,获得棋盘格标定板原点在各个角度下的平移向量 $T_{i1,j1}$ 。

为了得到双自由度旋转转台的转轴参数,将上述结果进行平面拟合以及空间圆拟合,得到其两个转轴的转轴参数,如表 1 所示。

表 1 拟合转台参数

Tab. 1 Fitting of rotary platform parameters

Rotor parameters	Experimental results/mm	Error/mm
Direction of vector	(-0.016 1, 0.999 8, -0.011 0)	0.24
Rotor position	(-45.008 1, -121.057 6, -24.864 2)	0.54
Direction of vector	(-0.034 7, -0.017 1, -0.999 3)	0.21
Rotor position	(-20.481 2, 111.883 4, 75.643 7)	0.43

## 4.2 测量精度验证实验

为了验证本文方法在实际场景中对全向空间目标的测量精度,建立了如图 10 所示的全向空间测量精度对比实验。如图 10 所示,本实验主要对比了本文测量方法与激光测距仪测量方法。

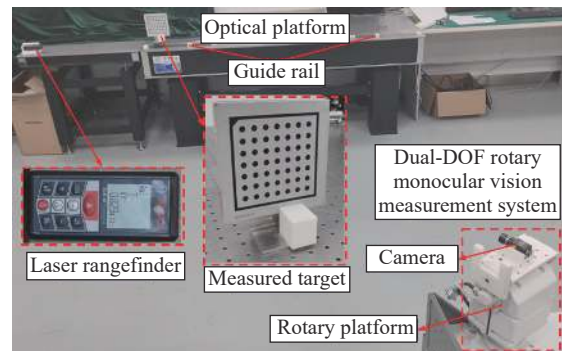


图 10 测量精度验证实验

Fig. 10 Measurement accuracy verification experiments

实验中所用的激光测距仪型号为 BOSCH GLM80,经多次测量后可以消除随机误差,使其测量精度达到 0.2 mm,两根导轨长度均为 500 mm。将靶标固定在滑块上,滑块可以在导轨上滑动,将两根导轨固定在光学平台上,使两个导轨共线。每次滑动 100 mm 左右,移动 10 个位置,用双自由度转台相机分别对移动前后的靶标进行跟随拍摄,计算出每个位置的三维空间坐标以及靶标的移动距离,同时用激光测距仪测量滑块移动前后相对于最初位置的移动距离,与本文方法进行对比。

测量结果如表 2 所示。由实验结果可知,与激光测距仪相比,平均误差可以达到 0.36 mm。不超过误差允许范围,该方法在精度方面可以满足全向空间的测量要求。

表 2 测量结果对比

Tab. 2 Comparison of measurement results

Location	Laser ranging/mm	The ranging method in this paper/mm	Error/mm
1	78.50	78.81	0.31
2	166.80	167.25	0.45
3	273.40	273.76	0.36
4	403.70	403.98	0.28
5	1424.50	1424.13	0.37
6	1501.80	1501.32	0.48
7	1612.30	1611.91	0.39
8	1740.60	1740.25	0.35
9	1871.40	1871.11	0.29

### 4.3 全空间测量范围验证实验

为了验证本文方法在实际场景中对全向空间中目标的测量范围,建立了如图 5 所示的全向空间测量系统。

本文所用到的 wMPS 测量系统是一种以激光信号作为测量媒介的测量方法,利用光电扫描进行角度交会测量,wMPS 测量系统测量时,激光发射站向测量空间内发射光信号,接收器记录光信号到来的时刻,并解算自身在每个发射站坐标系下的方位角及俯仰角。在接收到两个发射站的光信号时,接收器可通过不同测站间的角度交汇解算自身在全局测量坐标系下的坐标,wMPS 测量系统详细参数如表 3 所示。

表 3 wMPS 测量系统详细参数

Tab. 3 Detailed parameters of the wMPS measurement system

Content		Parameter
Working distance		5~25 m
System measurement accuracy	10 m working area	0.25 mm
	39 m working area	0.50 mm
Frequency		30 Hz

表 3 中,经多次测量消除随机误差后,wMPS 的测量精度可达到 0.25 mm。靶标安装至三脚架上,移动三脚架,在 4 m 的空间中分别移动约 29 个位置。同时,使用 wMPS,双目视觉测量系统与本文方法做对比。

进行测量的相机为工业相机,其视场角是固定的,所以双目视觉测量的测量范围是一定的,为了使测量结果能够进行对比分析,实验中将本文的测量系统与双目视觉测量系统放置在测量空间的同一侧。将 wMPS 信号接收器与靶标相对固

定,获取靶标在空间中的坐标。利用相机拍摄靶标上的圆点标定板,获取靶标的空间坐标。实验结果如图 11(彩图见期刊电子版)所示。

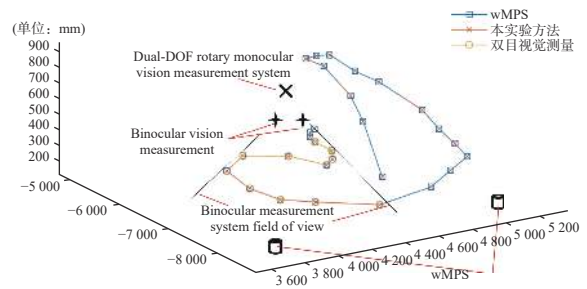
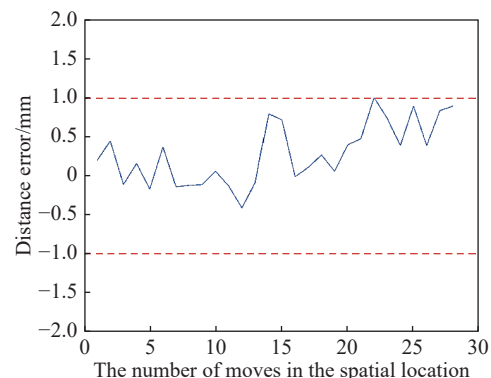
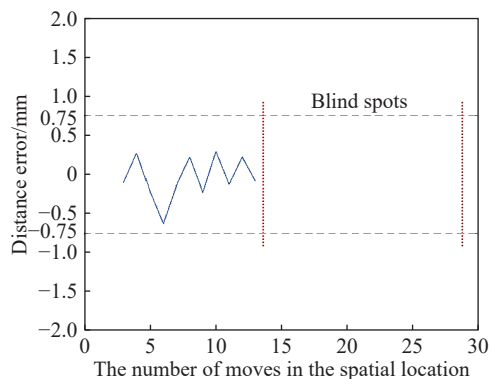


图 11 wMPS、双目与本实验方法目标点路径对比  
Fig. 11 Comparison of target point paths for wMPS, binocular and this experimental method

图 12、图 13 记录了 wMPS 测量系统、双目视觉测量方法以及本文方法对全空间测量的距离误差结果和位置误差结果,分别用这 3 种方法测得相邻位置目标点的距离,其中将本文测量方法分别与双目视觉测量方法和 wMPS 测量系统的结果进行比较。



(a) 本文方法与 wMPS 测量系统结果对比  
(a) Results comparison of the proposed method with the wMPS measurement system



(b) 本文方法与双目视觉测量系统结果比较  
(b) Results comparison of the proposed method with binocular vision measurement

图 12 各个相邻位置的目标点之间的距离误差结果  
Fig. 12 Distance error results between target points at each neighboring location

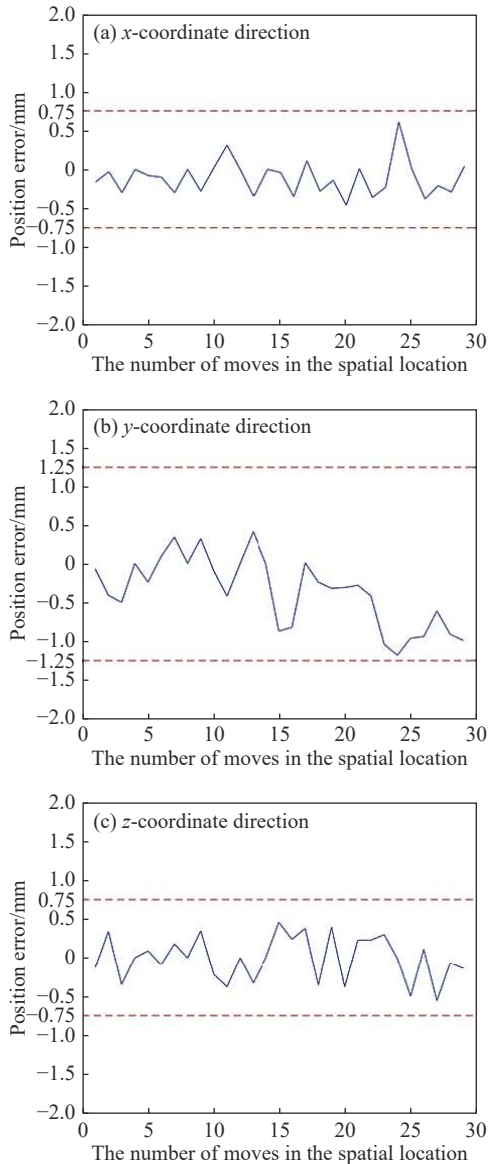


图 13 本文测量方法与 wMPS 测量系统各个目标点位置误差结果

Fig. 13 Comparison of the measurement method proposed in this paper with the wMPS measurement system for the position error results of each location target point

图 12(a) 为本文方法与 wMPS 测量系统间的误差结果, 图 12(b) 为本文方法与双目视觉测量方法间的误差结果。

如图 11 所示, 相机的视场角是一定的, 当目标超出相机的视场范围时, 双目视觉测量系统无法检测其目标点。相对于 wMPS 测量方法, 双目视觉测量方法得到的平均误差可以达到 0.42 mm; 本文测量方法得到的平均误差可以达到 0.36 mm。图 13(a)~13(c) 分别为在转台相机坐标系下, 目标点的各个位置坐标在  $x, y, z$  坐标轴上的误差结果。由于转台自身存在一定的角度误差, 利用角度计算目标点的转换矩阵会存在一定的偏差, 导致对目标点定位存在偏差。在不超过误差允许范围时, 本文测量方法可以满足对于全向空间中的测量精度要求。

## 5 结 论

本文针对单目视觉测量中存在的小视野的问题, 提出一种利用双自由度的旋转平台来实现全向空间的单目靶标式空间三坐标测量系统, 并利用多个副相机来标定旋转平台参数。通过标定 CCD 相机的内外参数和转台的转轴参数, 获得了相机和旋转平台在转动过程中的位置关系。将本文方法与激光测距仪的测量结果进行比较, 满足测量的精度要求。与 wMPS 测量系统的实验和模拟结果进行比较, 满足全空间范围的测量要求, 对该方法的有效性给予了证明。同时, 在大型设备的实际测试中, 测量精度为 0.36 mm, 验证了该试验体系的正确性。该方案在保持双目测量精度的基础上能有效扩大单目测量的测量范围, 提高单目视觉测量的稳定性和适用场合, 具有较高的实际应用价值。

## 参考文献:

- [1] 张宁, 付炜平, 孟荣, 等. 室内空间定位方法研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 882-892.  
ZHANG N, FU W P, MENG R, *et al.*. Review on the indoor space positioning methods[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(3): 882-892. (in Chinese).
- [2] 孙大洋, 章荣炜, 李赞. 室内定位技术综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 32-46.  
SUN D Y, ZHANG R W, LI Z. Survey of indoor localization[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2020, 3(3): 32-46. (in Chinese).
- [3] 马培兴, 王玫, 周隼, 等. 基于行人航迹推算的蓝牙峰值检测方法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(3): 851-856.  
MA P X, WANG M, ZHOU Z, *et al.*. Bluetooth peak detection method based on PDR[J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(3): 851-856. (in Chinese).

- [4] NEMRA A, AOUF N. Robust INS/GPS sensor fusion for UAV localization using SDRE nonlinear filtering[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(4): 789-798.
- [5] ZAFARI F, GKELIAS A, LEUNG K K. A survey of indoor localization systems and technologies[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2568-2599.
- [6] WU Y Q, JIA ZH ZH, DAI Y P, et al.. Research on WiFi location fingerprint positioning algorithm based on DPC-FCM clustering[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 2022: 8347084.
- [7] 黄正宇, 陈益强, 刘军发, 等. 基于众包数据的室内定位方法和平台[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(11): 1476-1484.
- HUANG ZH Y, CHEN Y Q, LIU J F, et al.. Indoor localization method and platform based on crowdsourcing data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(11): 1476-1484. (in Chinese).
- [8] SHU Y CH, HUANG Y H, ZHANG J Q, et al.. Gradient-based fingerprinting for indoor localization and tracking[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2424-2433.
- [9] 江德祥, 胡明清, 陈益强, 等. 基于核岭回归的自适应蓝牙定位方法[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(9): 3487-3489, 3492.
- JIANG D X, HU M Q, CHEN Y Q, et al.. Adaptive Bluetooth location method based on kernel ridge regression[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(9): 3487-3489, 3492. (in Chinese).
- [10] 崔哲, 杜进展, 刘飞, 等. UWB室内定位技术现状与应用展望[J]. *现代测绘*, 2022, 45(2): 10-15.
- CUI ZH, DU J ZH, LIU F, et al.. Current situation and application prospect of UWB indoor positioning technology[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2022, 45(2): 10-15. (in Chinese).
- [11] ZHANG D F, ROLT S, MAROPOULOS P G. Modelling and optimization of novel laser multilateration schemes for high-precision applications[J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(12): 2541-2547.
- [12] LIU ZH X, ZHU J G, YANG L H, et al.. A single-station multi-tasking 3D coordinate measurement method for large-scale metrology based on rotary-laser scanning[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(10): 105004.
- [13] YANG L H. Novel method for spatial angle measurement based on rotating planar laser beams[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(6): 758-764.
- [14] MANWILLER P E. A new modeling approach for a priori uncertainties of laser tracker angle measurements[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2023, 149(4): 04023009.
- [15] GUO Y G, LI Z CH, YANG H. Construction of precise three-dimensional engineering control network with total station and laser tracker[J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2023, 16(4): 321-329.
- [16] XIE Y, LIN J R, YANG L H, et al.. A new single-station wMPS measurement method with distance measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9677: 96771Z.
- [17] 李勤文, 倪首军, 王志乾, 等. 非公共视场双目相机位姿标定[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(12): 2737-2744.
- LI Q W, NI SH J, WANG ZH Q, et al.. Calibration of binocular camera with non-common field of view[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2737-2744. (in Chinese).
- [18] 吕家国, 蒋晓瑜, 张鹏炜, 等. 医疗机器人双目视觉硬件系统设计与实现[J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 307-314.
- LYU J G, JIANG X Y, ZHANG P W, et al.. Hardware design and implementation of binocular vision system for a medical robot[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 307-314. (in Chinese).
- [19] 陈天择, 葛宝臻, 罗其俊. 重投影优化的自由双目相机位姿估计方法[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1400-1409.
- CHEN T Z, GE B ZH, LUO Q J. Pose estimation for free binocular cameras based on reprojection error optimization[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1400-1409. (in Chinese).
- [20] 王向军, 邓子贤, 曹雨, 等. 野外大视场单相机空间坐标测量系统的快速标定[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1961-1967.
- WANG X J, DENG Z X, CAO Y, et al.. Fast calibration for single camera space coordinate measuring system with large field of view[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1961-1967. (in Chinese).
- [21] 赵显庭, 王晋疆, 王陈光. 基于转轴参数的多自由度双目视觉系统标定[J]. *光学技术*, 2018, 44(2): 140-146.
- ZHAO X T, WANG J J, WANG CH G. Calibration of multiple degrees of freedom binocular stereo vision system based on axis parameters[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(2): 140-146. (in Chinese).
- [22] ZHANG ZH Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [23] 岳晓奎, 侯小娟. 基于Rodrigues参数的视觉相对位姿确定算法[J]. *宇航学报*, 2010, 31(3): 753-757.

- YUE X K, HOU X J. Vision-based relative position and attitude determination using rodrigues parameters[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 753-757. (in Chinese).
- [24] 朱帆, 于芳苏, 吴易明, 等. P4P 法相机姿态标定精度分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1115005.  
ZHU F, YU F S, WU Y M, *et al.*. Analysis of attitude calibration precision of P4P camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1115005. (in Chinese).
- [25] 周江华, 苗育红, 王明海. 姿态运动的 Rodrigues 参数描述[J]. *宇航学报*, 2004, 25(5): 514-519.  
ZHOU J H, MIAO Y H, WANG M H. Attitude representation using rodrigues parameter[J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(5): 514-519. (in Chinese).
- [26] 冯萍, 魏振忠. 光笔式大视场三维视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9): 2217-2224.  
FENG P, WEI ZH ZH. Light probe based large FOV 3D vision measurement system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2217-2224. (in Chinese).
- [27] 王谭, 王磊磊, 张卫国, 等. 基于张正友标定法的红外靶标系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(8): 1828-1835.  
WANG T, WANG L L, ZHANG W G, *et al.*. Design of infrared target system with Zhang Zhengyou calibration method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1828-1835. (in Chinese).
- [28] 浮丹丹, 周绍光, 徐洋, 等. 基于主成分分析的点云平面拟合技术研究[J]. *测绘工程*, 2014, 23(4): 20-23.  
FU D D, ZHOU SH G, XU Y, *et al.*. Point cloud plane fitting technology based on principal component analysis[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2014, 23(4): 20-23. (in Chinese).
- [29] WANG G, WANG F F, XIONG F, *et al.*. Pulse signal preprocessing based on wavelet transform-principal component analysis[C]. *The 15th Textile Bioengineering and Informatics Symposium*, Bioengineering and Informatics Society, 2022: 34-39.
- [30] HE CH M, LI X R, HU Y Y, *et al.*. Microscope images automatic focus algorithm based on eight-neighborhood operator and least square planar fitting[J]. *Optik*, 2020, 206: 164232.
- [31] 秦锋, 鹿松, 张振虎. 基于 BFGS 算法的空间圆拟合方法[J]. *城市勘测*, 2022(6): 164-167.  
QIN F, LU S, ZHANG ZH H. Space circle fitting method based on BFGS algorithm[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2022(6): 164-167. (in Chinese).
- [32] NI Y B, WANG X J, YIN L. Relative pose estimation for multiple cameras using Lie algebra optimization[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(11): 2963-2972.

#### 作者简介:



吴 军(1986—), 男, 山西繁峙人, 2009 年于天津大学获得学士学位, 2014 年于天津大学获得博士学位, 现为中国民航大学副教授, 主要研究方向为激光与视觉检测技术。E-mail: [wujuncau@163.com](mailto:wujuncau@163.com)