

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311766

单目视觉空间移动靶位姿测量方法研究^{*}

刘其林^{1,2}, 董明利², 孙鹏², 燕必希², 祝连庆^{1,2}

(1. 长春理工大学光电工程学院 长春 130022; 2. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192)

摘要:为向室内定位技术定位精度及抗干扰能力提供高精度数据对比标准,提出单目视觉空间移动靶位姿测量方法。结合机器视觉投影矩阵求解与摄影测量后方交会技术,实现任意靶位姿下的相机外参数求解。首先,通过世界坐标系下地面控制点坐标及其像面坐标,计算真实相机站位;随后,根据靶点初始世界坐标及其实时像面坐标,求解虚拟相机站位;最后,根据虚拟及真实相机站位外参数,将靶点初始世界坐标变换至靶点实时世界坐标。实验结果表明,在 $10\text{ m}\times4.5\text{ m}\times3.8\text{ m}$ 测量空间中,靶位移距离测量误差 X 方向均方根误差(RMSE)为 0.358 3 mm , Y 方向RMSE为 0.350 9 mm , Z 方向RMSE为 1.475 2 mm 。靶姿态角 φ 测量RMSE为 0.094 0° , ω 测量RMSE为 0.089 3° , κ 测量RMSE为 0.025 4° 。满足大范围移动载体的高精度实时定位定姿需求。

关键词: 空间移动靶;单目视觉;虚拟相机站位;实时定位;实时定姿

中图分类号: TH701 P235.2 TP242.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.40

Research on the position and attitude measurement method of the spatially moving target in monocular vision

Liu Qilin^{1,2}, Dong Mingli², Sun Peng², Yan Bixi², Zhu Lianqing^{1,2}

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: To provide high-precision data standards for the positioning accuracy and anti-interference ability of indoor positioning technology, a position and attitude measurement method of the spatially moving target in monocular vision is proposed. The machine vision projection matrix solution and photogrammetry resection technology are combined to achieve the solution of camera exterior parameters through a target in any position and attitude. First, the real camera station is calculated through the ground control field target world coordinates and image coordinates. Then, the virtual camera station is solved based on the target initial world coordinates and real-time image coordinates. Finally, according to the virtual and real camera station exterior parameters, the initial world coordinates of the target are transformed into the real-time world coordinates of the target. The experimental results show that, in the measurement space of $10\text{ m}\times4.5\text{ m}\times3.8\text{ m}$, the root mean squared error (RMSE) of target displacement distance measurement is 0.358 3 mm in X direction, 0.350 9 mm in Y direction, and 1.475 2 mm in Z direction. The attitude angle measurement RMSE is 0.094 0° in φ , 0.089 3° in ω , and 0.025 4° in κ . This method can meet the needs of high-precision real-time positioning and attitude determination of moving targets in a large range.

Keywords: spatially moving target; monocular vision; virtual camera station; real-time positioning; real-time attitude determination

0 引言

随着物联网技术的发展,基于位置的服务技术日益受到关注,移动机器人的普适性应用也进一步促进了定位需求^[1]。现今,全球定位系统(global positioning system, GPS)、北斗导航等全球导航卫星系统主要负责室外设备的实时位置信息计算^[2]。在室内、厂房、隧道、矿井等环境下,室内定位技术则发挥着重要作用^[3]。

目前主流的室内定位技术主要有无线宽带(wireless-fidelity, Wi-Fi)^[4]、超宽带(ultra wide band, UWB)^[5]、射频识别(radio frequency identification, RFID)^[6]、ZigBee^[7]、蓝牙^[8]等。上述技术定位精度一般都在亚米级,且测量精度易受到如电磁干扰、光干扰等因素的影响^[9]。其中,WiFi 技术成本较低,一般为米级误差^[10];UWB 技术定位精度较高,一般为厘米级精度,但硬件成本高^[11];RFID 其传输速率较高,精度可达毫米级,但需部署大量 RFID 设备,功耗较大^[12];ZigBee 室内定位安全性高,功耗相对较低,但对算法的要求较高,定位精度为厘米级^[13];蓝牙技术虽成本低易部署,但极易受电磁干扰,定位精度为厘米级^[14]。在强电磁或杂光干扰环境下,上述技术均无法完全避免精度下降这一问题,且相互之间无法提供精度评价标准。因此,在干扰环境下为室内定位技术提供大范围高精度高频率定位数据对比标准,以更好的研究定位误差与干扰因素间的作用机理,成为上述应用中亟待解决的关键问题。而摄影测量技术对电磁及杂光等因素均具备很强的抗干扰能力。且具有测量范围广,测量效率高,安装灵活,功耗低,易操作等优势。可高精度同时测量大范围内大量空间目标点或目标对象的空间位置及姿态信息^[15],可在电磁及杂光干扰下的室内定位技术精度分析及补偿机理研究中发挥关键作用。

综合以上技术现状,本文将摄影测量技术作为抗干扰高精度测量手段应用于室内定位研究领域。搭建单目摄影测量系统,对空间中的运动靶进行实时测量。以机器视觉投影矩阵解算方法及摄影测量相机外方位参数后方交会算法为基础,推导机器视觉相机外方位参数与摄影测量相机外方位参数间的转换关系。实时更新摄影测量相机外方位参数初值,实现相机相对于任意位姿靶的非线性最小二乘法外参数定向求解。

该方法解决了空间移动靶位姿变化导致的相机后方交会解算失败问题。最终通过将空间移动靶初始世界坐标向虚拟相机坐标系及世界坐标系进行两步坐标变换,实现大范围空间移动靶的实时高精度位姿测量,定位精度可达亚毫米级,定姿精度可达角分级。该研究为室内定位技术精度分析提供了新的摄影测量评估方法及系

统。可为电磁及杂光干扰下的室内定位技术实时提供大范围高精度的测量数据对比标准。

1 理论分析

1.1 世界坐标系下相机外方位参数解算方法

在摄影测量相机成像模型中,世界坐标系下空间点 $D(X, Y, Z)$ 投影至像面坐标 $d(x, y)$ 的数学描述与基于共线方程的相机成像模型相符,如式(1)所示。

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{\mathbf{R}_{11}(X - T_x) + \mathbf{R}_{12}(Y - T_y) + \mathbf{R}_{13}(Z - T_z)}{\mathbf{R}_{31}(X - T_x) + \mathbf{R}_{32}(Y - T_y) + \mathbf{R}_{33}(Z - T_z)} + x_p - \Delta x \\ y &= -f \frac{\mathbf{R}_{21}(X - T_x) + \mathbf{R}_{22}(Y - T_y) + \mathbf{R}_{23}(Z - T_z)}{\mathbf{R}_{31}(X - T_x) + \mathbf{R}_{32}(Y - T_y) + \mathbf{R}_{33}(Z - T_z)} + y_p - \Delta y \\ \Delta x &= \bar{x}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(2\bar{x}^2 + r^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y} + b_1\bar{x} + b_2\bar{y} \\ \Delta y &= \bar{y}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_2(2\bar{y}^2 + r^2) + 2P_1\bar{x}\bar{y} \\ \bar{x} &= x - x_p \quad \bar{y} = y - y_p \quad r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: (x_p, y_p) 为像面主点; f 为相机主距; $[\Delta x, \Delta y]^T$ 代表真实成像点与理想小孔成像点之间的畸变偏移量; K_1, K_2, K_3 代表径向畸变系数; P_1, P_2 代表切向畸变系数; b_1, b_2 代表面内畸变系数; r 代表目标点成像位置距离主点的成像半径; $\mathbf{R}, \mathbf{T}$ 分别代表相机相对于世界坐标系的旋转矩阵及平移矩阵,由相机站位的外方位参数组成。

对相机内方位参数 (f, x_p, y_p) 及畸变系数 $(K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, b_1, b_2)$ 进行多站位光束平差标定后,若已知 n 个空间点坐标 $\mathbf{D}_n(X, Y, Z)$ 及其对应的像面坐标 $d_n(x, y)$,则可根据共线方程构建以相机外方位参数为待优化量的 $2n$ 个观测方程。 n 个空间点像面坐标成像方程经过一阶泰勒公式展开,其 $2n$ 个线性化误差方程的矩阵运算形式可表达为式(2)。

$$\begin{bmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ \vdots \\ v_{x_n} \\ v_{y_n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{x_1} \\ l_{y_1} \\ \vdots \\ l_{x_n} \\ l_{y_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{x_1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial \kappa} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial T_x} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial T_y} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial T_z} \\ \frac{\partial F_{y_1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial \kappa} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial T_x} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial T_y} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial T_z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_{x_n}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{x_n}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{x_n}}{\partial \kappa} & \frac{\partial F_{x_n}}{\partial T_x} & \frac{\partial F_{x_n}}{\partial T_y} & \frac{\partial F_{x_n}}{\partial T_z} \\ \frac{\partial F_{y_n}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{y_n}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{y_n}}{\partial \kappa} & \frac{\partial F_{y_n}}{\partial T_x} & \frac{\partial F_{y_n}}{\partial T_y} & \frac{\partial F_{y_n}}{\partial T_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varphi \\ \Delta \omega \\ \Delta \kappa \\ \Delta T_x \\ \Delta T_y \\ \Delta T_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: F 代表共线方程函数, $(\varphi, \omega, \kappa, T_x, T_y, T_z)$ 为待优化相机外方位参数。其简化表达为:

$$\underset{(2n \times 1)}{\mathbf{v}} + \underset{(2n \times 1)}{\mathbf{l}} = \underset{(2n \times 6)}{\mathbf{J}} \underset{(6 \times 1)}{\hat{\delta}} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为像面目标点坐标残余误差, $\mathbf{l}$ 表示空间点像面坐标观测值与利用位姿参数估计值求解所得像面坐标值之间的差值。 $\mathbf{J}$ 表示空间点成像方程对相机姿态角及空间位置参数求导的雅克比矩阵, $\hat{\delta}$ 表示相机姿态角及空间位置参数的改正量, 改正量求解方程为:

$$\hat{\delta} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{l} \quad (4)$$

利用高斯牛顿算法, 给定相机姿态角及位置参数初值 $(\varphi_0, \omega_0, \kappa_0, T_{x0}, T_{y0}, T_{z0})$, 通过求解所得参数改正量对相机姿态角及位置坐标初值进行迭代修正, 可求得最佳相机姿态角及位置参数。由此可求得世界系下相机站位所对应的旋转矩阵 $\mathbf{R}_{cf}$ 与平移矩阵 $\mathbf{T}_{cf}$ 。

1.2 靶对应相机虚拟站位外方位参数解算方法

测量开始前, 将靶放置在世界坐标系下任意位置保持静止, 并测得 m 个靶上目标点在初始时刻 t_0 的世界系坐标值 $\mathbf{C}_{m0}(X_{m0}, Y_{m0}, Z_{m0})$ 。当 $m \geq 3$, 且靶在空间中移动至第 t_n 时刻时, 可利用 $\mathbf{C}_{m0}(X_{m0}, Y_{m0}, Z_{m0})$ 及其在第 t_n 时刻的靶点像面成像坐标 $\mathbf{c}_{mtn}(x, y)$, 采用上述摄影测量后方交会算法, 解算出相机相对于移动靶第 t_n 时刻成像位置的旋转矩阵 $\mathbf{R}_{cct_n}$ 及平移矩阵 $\mathbf{T}_{cct_n}$ 。由于在解算相机与移动靶的相对位姿过程中, 靶空间坐标始终采用 $\mathbf{C}_{m0}(X_{m0}, Y_{m0}, Z_{m0})$, 而其像面坐标 $\mathbf{c}_{mtn}(x, y)$ 随靶运动而变化。导致算法视角中, 在靶运动 t_n 个位置及姿态时, 会产生 t_n 组相机外方位参数。对应 t_n 个相机虚拟站位, 如图 1 所示。

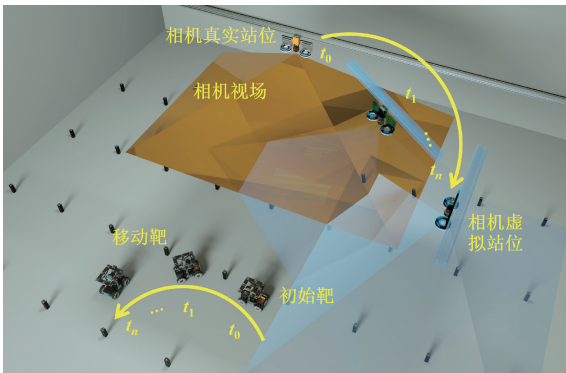


图 1 算法视角相机虚拟站位变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of camera virtual station changes under the algorithm perspective

在使用最小二乘法对相机外方位参数进行求解时, 高斯牛顿或列文伯格-马夸尔特 (Levenberg-Marquardt, LM) 迭代算法往往对相机待优化参数的初值选取较为敏感。若与真实值偏差过大, 会导致相机外方位参数解算失败。当靶旋转幅度或平移幅度过大时, 仅选用同一组外参数初值对 t_n 个时刻下的相机虚拟站位外参数进行迭代计算, 便会导致解算失败。

为保证全时刻下视场内移动靶所对应的各个相机虚拟站位外参数可全部正解, 需对相机虚拟站位的外参数初值进行估算。在计算机视觉中, 世界坐标系下空间点坐标 $\mathbf{P}(X_w, Y_w, Z_w)$ 与其像面投影点坐标 $\mathbf{p}(u, v)$ 存在如下关系:

$$\mathbf{Z}_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{X}_w = \mathbf{M} \mathbf{X}_w \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Z}_c$ 为相机光轴方向物距; d_x, d_y 为每个像素在像面坐标系下 x, y 方向上的物理像元尺寸; f 为主距; (u_0, v_0) 为主点坐标; $\mathbf{R}, \mathbf{T}$ 为相机相对于世界坐标系的旋转及平移矩阵; $\mathbf{M}$ 为投影矩阵, 包含相机内外参数。若 $(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, 1)$ 为第 i 个点的世界坐标; $(u_i, v_i, 1)$ 为第 i 个点的图像坐标; m_{ij} 为投影矩阵 $\mathbf{M}$ 的第 i 行第 j 列元素, 则有:

$$\begin{aligned} X_{wi} m_{11} + Y_{wi} m_{12} + Z_{wi} m_{13} + m_{14} - u_i X_{wi} m_{31} - \\ u_i Y_{wi} m_{32} - u_i Z_{wi} m_{33} &= u_i m_{34} \\ X_{wi} m_{21} + Y_{wi} m_{22} + Z_{wi} m_{23} + m_{24} - v_i X_{wi} m_{31} - \\ v_i Y_{wi} m_{32} - v_i Z_{wi} m_{33} &= v_i m_{34} \end{aligned} \quad (6)$$

当存在 n 个已知空间坐标及对应像面坐标的目标点时, 可根据式 (6) 构建 $2n$ 个关于 $\mathbf{M}$ 矩阵元素的线性方

程,其矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 Z_{w1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{wn} & -u_1 Y_{wn} & -u_1 Z_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & -v_1 X_{wn} & -v_1 Y_{wn} & -v_1 Z_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 m_{34} \\ v_1 m_{34} \\ \vdots \\ \vdots \\ u_n m_{34} \\ v_n m_{34} \end{bmatrix} \quad (7)$$

指定 $m_{34} = 1$, 式(7)可简写为:

$$\underset{(2n \times 11)}{\mathbf{K}} \underset{(11 \times 1)}{\mathbf{m}} = \underset{(2n \times 1)}{\mathbf{U}} \quad (8)$$

线性最小二乘法求解上述线性方程的解为:

$$\mathbf{m} = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{U} \quad (9)$$

存在 6 个以上已知空间及对应像面坐标的目标点,即可求出 $\mathbf{M}$ 矩阵。进而根据式(5)对 $\mathbf{M}$ 矩阵中的外方位参数进行解算。可为不同位姿靶所对应的相机虚拟站位提供机器视觉模型中定义的相机外参数。其与摄影测量模型中定义的相机外参数存在转换关系。

在摄影测量中,世界坐标系下空间点坐标 $\mathbf{X}_w$ 与相机系下同一空间点坐标 $\mathbf{X}_c$ 的转换计算如式(10)中所示,变换顺序为先平移后旋转。

$$\mathbf{X}_w = \mathbf{R}_{cw_p} (\mathbf{X}_c - \mathbf{T}_{cw_p}) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{R}_{cw_p}$ 与 $\mathbf{T}_{cw_p}$ 是摄影测量中定义的相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵及平移矩阵。机器视觉模型中,世界坐标系下空间点坐标 $\mathbf{X}_w$ 与相机系下同一空间点坐标 $\mathbf{X}_c$ 的转换计算如式(11)中所示,变换顺序为先旋转后平移。

$$\mathbf{X}_w = \mathbf{R}_{cw_m} \mathbf{X}_c + \mathbf{T}_{cw_m} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{R}_{cw_m}$ 与 $\mathbf{T}_{cw_m}$ 是机器视觉中定义的相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵及平移矩阵。在两种模型定义中, $\mathbf{X}_c$ 与 $\mathbf{X}_w$ 均为同一空间目标点在相机系与世界系下坐标。则两种 $\mathbf{R}$, $\mathbf{T}$ 的定义存在如下等式关系:

$$\mathbf{R}_{cw_m} \mathbf{X}_c + \mathbf{T}_{cw_m} = \mathbf{R}_{cw_p} (\mathbf{X}_c - \mathbf{T}_{cw_p}) \quad (12)$$

推导可得 $\mathbf{R}_{cw_m}$, $\mathbf{T}_{cw_m}$ 与 $\mathbf{R}_{cw_p}$, $\mathbf{T}_{cw_p}$ 存在转换关系:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{cw_p} &= \mathbf{R}_{cw_m} \\ \mathbf{T}_{cw_p} &= (\mathbf{R}_{cw_m})^{-1} (-\mathbf{T}_{cw_m}) \end{aligned} \quad (13)$$

根据式(13)可将投影矩阵计算所得外方位参数转换至摄影测量外方位参数。为非线性最小二乘法解算各位姿下移动靶所对应的相机虚拟站位提供相对准确的外方位参数初值。保证 $\mathbf{R}_{cct_n}$, $\mathbf{T}_{cct_n}$ 解算正确。

1.3 世界坐标系下空间移动靶位姿实时解算

空间移动靶位姿实时计算中,首先,利用 t_n 时刻 m 个靶点像面坐标 $\mathbf{c}_{m_n}(x, y)$ 及 t_0 时刻靶点世界坐标 $\mathbf{C}_{m0}(X_{m0}, Y_{m0}, Z_{m0})$, 通过计算投影矩阵 $\mathbf{M}$ 完成相机虚拟站位外方位参数初值的实时估算。将外参初值按式(13)转换后代入摄影测量后方交会算法,解算 t_n 时刻移动靶对应相机虚拟站位外参数矩阵 $\mathbf{R}_{cct_n}$ 与 $\mathbf{T}_{cct_n}$ 。随后,利用 n 个地面控制点世界坐标 $\mathbf{D}_n(X, Y, Z)$ 及其像面坐标 $\mathbf{d}_n(x, y)$, 通过后方交会算法解算相机真实站位外参数矩阵 $\mathbf{R}_{cf}$ 与 $\mathbf{T}_{cf}$ 。最终,为求解第 t_n 时刻下移动靶在世界坐标系下的空间位姿信息,需将其在初始时刻 t_0 的世界系坐标值 $\mathbf{C}_{m0}(X_{m0}, Y_{m0}, Z_{m0})$ 通过 t_n 时刻相机虚拟站位外参数矩阵 $\mathbf{R}_{cct_n}$, $\mathbf{T}_{cct_n}$ 及相机真实站位外参数矩阵 $\mathbf{R}_{cf}$, $\mathbf{T}_{cf}$ 进行两步转换。具体计算形式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{m_n} &= (\mathbf{R}_{cf})^{-1} \mathbf{R}_{cct_n} (\mathbf{C}_{m0} - \mathbf{T}_{cct_n}) + \mathbf{T}_{cf} \\ \mathbf{RC}_{m_n} &= (\mathbf{R}_{cf})^{-1} \mathbf{R}_{cct_n} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{C}_{m0}$ 为移动靶初始时刻世界系下靶点空间坐标; $\mathbf{C}_{m_n}$ 为第 t_n 时刻下移动靶在世界坐标系下的靶点空间坐标; $\mathbf{RC}_{m_n}$ 为第 t_n 时刻下移动靶在世界坐标系下的姿态矩阵。先利用 $\mathbf{R}_{cct_n}$ 与 $\mathbf{T}_{cct_n}$ 将靶 t_0 时刻初始世界坐标变换至 t_n 时刻相机虚拟站位坐标系下,再通过 $\mathbf{R}_{cf}$ 与 $\mathbf{T}_{cf}$, 将 t_n 时刻虚拟相机坐标系下靶点坐标反向变换至世界坐标系下。通过式(14),可得第 t_n 时刻下移动靶在世界坐标系下的空间坐标 $\mathbf{C}_{m_n}$ 及靶姿态矩阵 $\mathbf{RC}_{m_n}$ 。分解 $\mathbf{RC}_{m_n}$ 即得靶姿态角 $(\varphi_n, \omega_n, \kappa_n)$ 。

2 测量实验及结果分析

2.1 系统构成

测量所需硬件系统由移动靶平台,测量系统及地面控制场组成。移动靶平台由大疆机甲大师 RoboMaster S1, 1060 合金矩形立体结构件和 9 个回光反射编码点组

成。测量系统包含靶位姿测量,地面控制场测量及对比测量系统。靶位姿测量系统由工业相机(MV-CH120-10UM, HIKROBOT, Hangzhou, China)和镜头(LM6FC, Phenix Optics, Jiangxi, China)组成。镜头主距 6.5 mm, 成像视场角 $95.7^{\circ} \times 78.8^{\circ}$, 图像传感器 Sony IMX304 1.1" CMOS, 像元尺寸 $3.45 \mu\text{m}$, 分辨率 4096×3000 。系统闪光单元由两台环形闪光灯(RMX75, Smart vision lights, Michigan, United States)组成, 闪光频率最高可达 100 Hz。地面控制场测量系统采用静态摄影测量系统

(V-STARS, GSI, Florida, United States), 三维空间测量精度 $4.0 \mu\text{m} + 4.0 \mu\text{m}/\text{m}$ 。对比测量系统由激光跟踪仪(API T3, API, Maryland, United States)及安装在移动靶上的靶球基座与靶球组成, 三维空间测量精度 $5.0 \mu\text{m}/\text{m}$ 。地面控制场由光学平台磁吸底座(PMB-1, Qiuhe Precise Electromechanical, Shanghai, China)与回光反射编码点组成。完成相机初次定向后, 即可撤去地面控制场, 仅保留单目相机进行图像采集。硬件系统布设及测量示意图如图 2 所示。

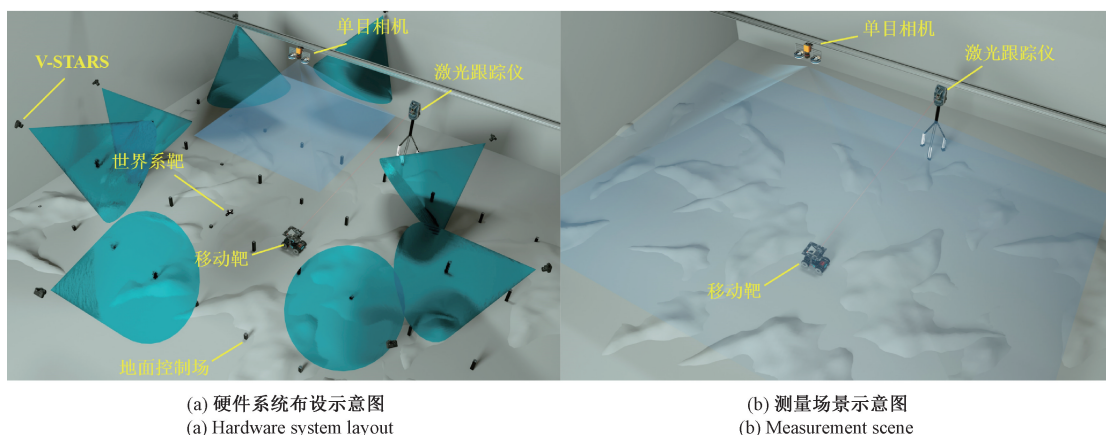


图2 硬件系统布设及测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hardware system layout and measurement

测量软件系统包括数据获取模块, 实时计算模块及误差分析模块。数据获取模块中, 由 V-STARS 静态摄影测量系统负责对世界坐标系下地面控制场编码点及初始时刻移动靶编码点的坐标进行高精度测量。由单目相机系统负责地面控制场及靶运动过程中的图像采集, 实时进行编码点识别, 通过灰度重心法计算像面点中心坐标, 获得初始时刻地面控制场编码点对应像面坐标及全时刻移动靶编码点对应像面坐标。由激光跟踪仪负责对靶上激光靶球进行实时跟踪测量, 记录每个时刻各个靶球的空间坐标。实时计算模块中, 利用单目相机采集的图像数据及 V-STARS 测量所得三维数据, 对全时刻移动靶进行实时三维位姿计算并记录数据。误差分析模块中, 将激光跟踪仪测量所得多个时刻的各靶球空间坐标及多靶球拟合平面的姿态角信息进行统计, 同时对实时计算模块中所得对应时刻的靶位姿数据进行统计。计算靶球及靶点在相邻时刻中的运动距离和靶面姿态角差值, 评价系统测量精度。系统架构图如图 3 所示。

2.2 现场实测

现场测量空间范围为 $10 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} \times 3.8 \text{ m}$ 。单目相机系统架设高度 3.8 m, 采用双环闪扩大有效照明范围。成像系统如图 4(a) 所示。靶上粘贴 9 个编码点, 固定安装 3 个靶球基座, 整体安装在 RoboMaster S1 上, 可通过控制 RoboMaster S1 实现靶在视场范围内的移动, 移动靶

平台如图 4(b) 所示。在地面等间距布设随机高度的编码点, 构成地面控制场, 放置静态摄影测量十字靶, 定义世界坐标系。将移动靶平台放置在相机视场内静止。使用 V-STARS 静态摄影测量系统对控制场及静止移动靶进行多站位拍摄, 解算出世界系下全部空间点坐标。标定场景如图 4(c) 所示。单目相机成像系统内方位参数及畸变参数提前在实验室内完成标定。现场安装后, 单目相机系统开机运行 1 h, 待成像系统进入热平衡后, 控制 RoboMaster S1 实现靶在视场范围内的运动。单目相机进行 30 Hz 连续采图并实时解算移动靶点空间坐标。测量现场如图 4(d) 所示。在对移动靶点坐标进行实时解算的同时, 记录部分时刻激光跟踪仪测量所得 3 基座对应靶球坐标。实测实验中, 软件系统依靠各个时刻单目相机图像对单个靶(9 编码点)在对应时刻的空间坐标进行实时解算, 并利用计算所得 9 个靶点坐标构建空间矢量及平面, 对移动靶运动位置、姿态及方向进行解算。整体系统采用 C++ 语言构建, 运算 CPU 为 i7-9750h, 单次测量耗时 0.012 s。理论上可在 83 Hz 以内的图像采集帧率上实现空间移动靶的实时高精度定位定姿功能。

2.3 数据分析

在实测实验中, 利用地面控制场目标点与移动靶目标点, 完成相机真实站位及各时刻相机虚拟站位的外参矩阵解算后, 利用式 (14) 对各时刻移动靶点的实时世

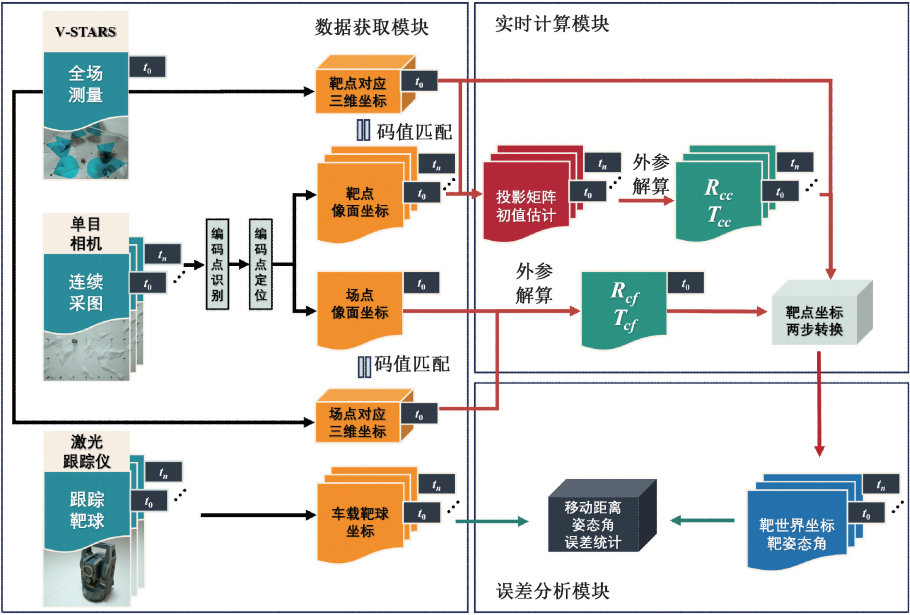


图 3 系统架构图
Fig. 3 System architecture diagram

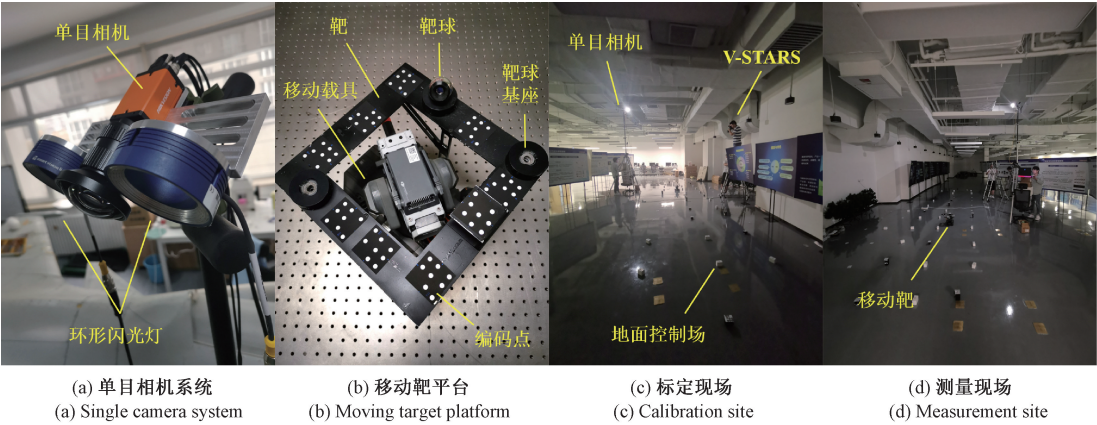


图 4 系统设备及现场测量
Fig. 4 System equipment and on-site measurement

界坐标进行解算。移动靶部分时刻的现场解算结果如图 5 所示。

1) 相机外参数解算精度评价

在计算相机外方位参数阶段,为评价相机定向精度,在相机利用控制场及空间移动靶进行外方位参数解算后,对全部空间点的像面反投影误差进行统计。对 500 个时刻下相机虚拟站位所对应的靶点像面反投影误差进行完全统计,误差分布如图 6 (a) 所示。其像面误差 $RMSE=0.1646\text{ }\mu\text{m}$ (1/21 pixels)。相机利用控制场数据进行外参数解算后的像面反投影误差分布如图 6(b) 所示。其像面误差 $RMSE=0.1502\text{ }\mu\text{m}$ (1/23 pixels)。相机利用某时刻 9 个靶点进行外参数解算后的像面反投

影误差分布如图 6 (c) 所示。其像面误差 $RMSE=0.1708\text{ }\mu\text{m}$ (1/20 pixels)。表 1 统计了上述 3 类相机定向反投影误差。

2) 空间移动靶定位定姿精度评价

为评价系统对空间移动靶的定位定姿精度,现场测量阶段,利用激光跟踪仪在 962 个时刻下采集靶上 3 个靶球的空间坐标。测量点位覆盖整个单目相机视场范围。定位精度方面,采用每两个时刻同一靶球间的运动距离作为精度评价标准。定姿精度方面,采用每个时刻 3 靶球拟合平面的姿态角作为精度评价标准。将单目相机系统解算所得靶上编码点移动距离与激光跟踪仪测量所得靶球移动距离分别分解在 X,Y,Z 轴向上,统计定

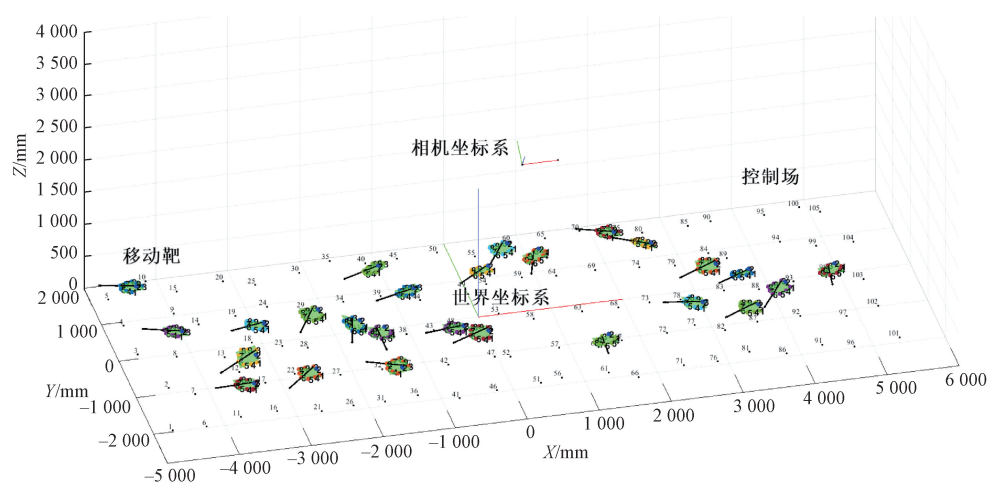


图 5 移动靶部分时刻的现场解算结果

Fig. 5 Part of the on-site calculation results of the moving target

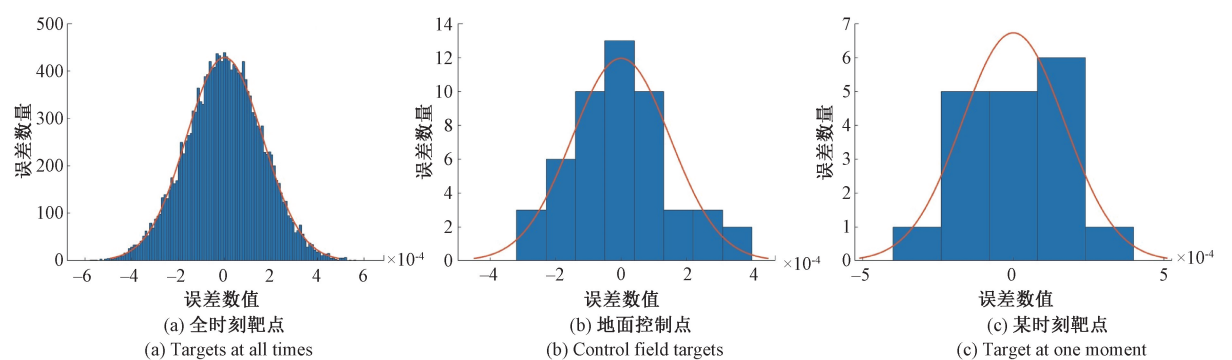


图 6 相机定向反投影误差分布

Fig. 6 Camera orientation backprojection error

表 1 相机定向反投影误差统计

Table 1 Camera orientation reprojection error statistics

统计类别	初始时刻相机 与控制场/ μm	初始时刻相机 与控制场/pixel	某时刻相机 与靶/ μm	某时刻相机 与靶/pixel	全时刻相机 与靶/ μm	全时刻相机 与靶/pixel
RMSE	0.150 2	1/23	0.170 8	1/20	0.164 6	1/21
平均误差	$2.547\ 6\times 10^{-4}$	—	$2.125\ 7\times 10^{-5}$	—	$1.295\ 4\times 10^{-6}$	—

位误差。同时,统计两系统靶姿态角定姿误差。靶定位误差分布如图 7 所示。靶定姿误差分布如图 8 所示。靶位姿测量误差数据统计如表 2 所示。

由表 2 可知,靶空间运动距离及姿态角测量误差均符合正态分布。其中,最大距离测量误差为 Z 方向 $4.827\ 4\ \text{mm}$ 。相对移动靶在 X,Y 面内方向的测量误差,测量误差在 Z 方向,即深度方向误差较大。这是由于单目相机测量系统在靶点深度方向信息的恢复方面,缺少更多的辅助观测信息,进而对深度方向的数值变化不敏感。像面目标点

观测误差会直接传递至最终的定位误差。

同理,姿态角测量误差同样受测量系统深度方向位移检测弱敏感度的影响。在靶发生绕世界坐标系 Y 轴(φ)或 X 轴(ω)的姿态偏转时,其各个靶点在世界坐标系 Z 轴方向(深度方向)上发生位移,导致姿态角 φ 与 ω 测量误差相对较大。当靶发生绕世界坐标系 Z 轴(κ)的姿态偏转时,其上靶点基本在 XOY 平面内发生移动,靶姿态角 κ 测量精度相对较高,其 RMSE 为 $0.025\ 4^\circ$,最大误差为 $0.124\ 1^\circ$ 。

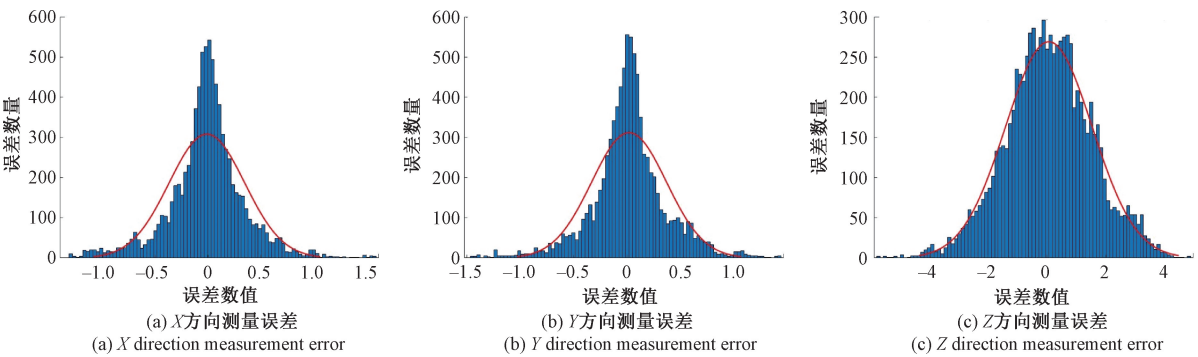


图 7 移动靶位移距离测量误差分布图

Fig. 7 Distribution map of measurement error of moving target displacement

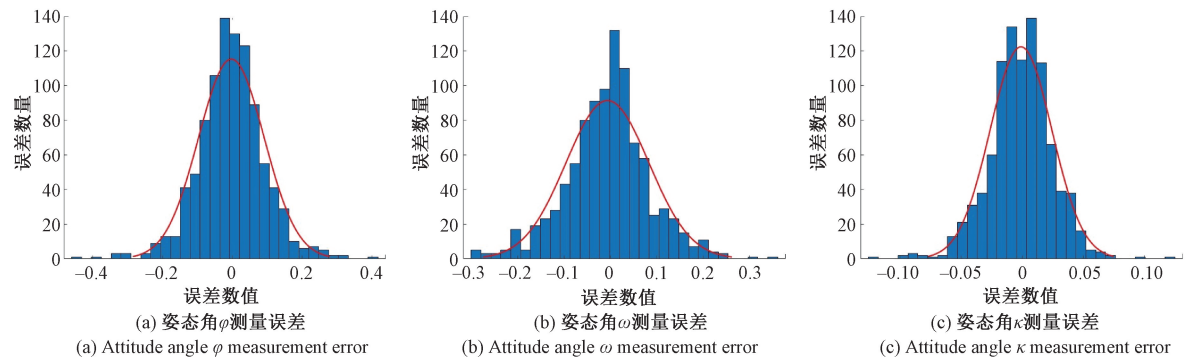


图 8 移动靶姿态角测量误差分布图

Fig. 8 Distribution map of measurement error of moving target attitude angle

表 2 空间移动靶位移及姿态角测量误差统计

Table 2 Data statistics of displacement and attitude angle measurement error of the moving target

误差类别	X/mm	Y/mm	Z/mm	$\varphi/(^{\circ})$	$\omega/(^{\circ})$	$\kappa/(^{\circ})$
RMSE	0.358 3	0.350 9	1.475 2	0.094 0	0.089 3	0.025 4
平均误差	0.010 3	0.022 0	0.063 8	-0.002 6	-0.006 4	-0.001 0
最大误差	1.591 2	1.445 8	4.827 4	0.416 0	0.357 6	0.124 1

3 结 论

通过对单目视觉空间移动靶位姿测量方法的理论
研究及实验验证可知,该方法与目前其他室内定位方
法相比,在无视觉遮挡情况下具有更高的测量精度。
其空间定位精度可达亚毫米级,空间定姿精度可达角
分级。该系统的测量设备及方法本身对电磁干扰不敏
感,且由于图像采集曝光时间极短,镜头光圈小,系统
抗杂光干扰能力强。可为强电磁及杂光干扰环境下的
室内定位技术提供实时大范围高精度定位数据对比标
准。系统部署快速,硬件设备的安装及操作复杂度
较低。

在未来研究中,可利用超广视场角相机扩大单目测
量范围。同时,通过多相机组网测量,可进一步提高交
汇视场内移动靶在深度方向上的测量精度。

参考文献

[1] 薛敏,孙炜,余洪山,等. 基于 WiFi 指纹的层级学习
室内定位模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2021,
35(4): 118-126.
XUE M, SUN W, YU H SH, et al. Hierarchical deep
learning model to locate the mobile device via WiFi
fingerprints[J]. Journal of Electronic Measurement and
Instrumentation, 2021, 35(4): 118-126.
[2] WANG C, XU A, KUANG J, et al. A high-accuracy
indoor localization system and applications based on

- tightly coupled UWB/INS/floor map integration [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(16): 18166-18177.
- [3] 刘挺, 杜小甫, 黄昆达, 等. 高精度室内定位算法与技术综述[J]. 电子测试, 2021(5): 73-75.
LIU T, DU X F, HUANG K D, et al. Survey of high precision indoor positioning algorithms and techniques[J]. Electronic Test, 2021(5): 73-75.
- [4] SHANG S, WANG L. Overview of WiFi fingerprinting-based indoor positioning [J]. IET Communications, 2022, 16(7): 725-733.
- [5] SUNG S, KIM H, JUNG J I. Accurate indoor positioning for UWB-based personal devices using deep learning[J]. IEEE Access, 2023, 11: 20095-20113.
- [6] 谢良波, 夏晨晖, 张钰坤, 等. 基于双频点载波相位的 RFID 室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 267-277.
XIE L B, XIA CH H, ZHANG Y K, et al. RFID indoor localization algorithm based on dual-frequency carrier phase [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 267-277.
- [7] SUSENO J E, SAFITRI H, SUGITO H, et al. Measurement system of 3-D position using a ZigBee S2C radio module based on a neural network, AIP Conference Proceedings, Semarang, Indonesia[C]. AIP Publishing, 2023.
- [8] MAALOUL K, LEJDEL B, CLEMENTINI E, et al. Bluetooth beacons based indoor positioning in a shopping malls using machine learning[J]. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 2023, 12(2): 911-921.
- [9] HUANG J, JUNGINGER S, LIU H, et al. Indoor positioning systems of mobile robots: A review [J]. Robotics, 2023, 12(2): 47.
- [10] CUI W, LIU Q, ZHANG L, et al. A robust mobile robot indoor positioning system based on Wi-Fi [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, DOI:10.1177/1729881419896660.
- [11] LIU Y, SUN R, LIU J, et al. Research on the positioning method of autonomous mobile robot in structure space based on UWB[C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2019: 278-282.
- [12] BERNARDINI F, MOTRONI A, NEPA P, et al. Particle swarm optimization in multi-antenna SAR-based localization for UHF-RFID tags [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2019: 291-296.
- [13] LUO R C, HSIAO T J. Dynamic wireless indoor localization incorporating with an autonomous mobile robot based on an adaptive signal model fingerprinting approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66: 1940-1951.
- [14] PARHI D. Advancement in navigational path planning of robots using various artificial and computing techniques[J]. International Robotics and Automation Journal, 2018, 4: 133-136.
- [15] LIU Q, DONG M, SUN P, et al. All-parameter calibration method of the on-orbit multi-view dynamic photogrammetry system [J]. Optics Express, 2023, 31(7): 11471-11489.

作者简介



刘其林, 2016 年于北京联合大学获得学士学位, 2019 年于北京信息科技大学获得硕士学位, 现为长春理工大学博士研究生, 主要研究方向为视觉与光电检测。

E-mail: 2019200060@mails.cust.edu.cn

Liu Qilin received his B.Sc. degree in 2016 from Beijing Union University, received his M.Sc. degree in 2019 from Beijing Information Science and Technology University. He is currently a Ph. D student in Changchun University of Science and Technology. His main research interest is vision and photoelectric detection.



祝连庆(通信作者), 分别在 1984 年和 1989 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光电精密测试技术。

E-mail: zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1984 and 1989, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interest is opto-electrical precision measurement.