

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615236

基于镜像反射靶标与距离约束的探地雷达-相机 外参时空标定方法*

刘万里¹, 黄建辉¹, 张学亮²

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116; 2. 煤炭工业规划设计研究院有限公司 北京 100120)

摘 要: 外参时空标定是探地雷达与相机数据融合的前提和基础,然而现有的标定方法存在观测目标难、误差累积大、时间不同步等问题。为此,提出了一种基于镜像反射靶标与距离约束的探地雷达-相机外参时空标定方法,该方法有效融合公共靶标、镜像协同和距离约束函数,实现在无场景先验信息的探地雷达-相机外参时空标定。具体而言,首先设计一套探地雷达-相机外参时空标定装置,通过引入镜像反射变换间接实现探地雷达与相机对公共靶球的同时观测。其次,提出一种融合 Huber 核函数约束和加权最小二乘的全局联合优化方法,有效抑制标定过程中误差累积。最后,利用距离约束函数来同步两种数据流:时间均匀分布的相机图像信息和空间均匀分布的探地雷达/轮式编码器距离信息,实现探地雷达与相机的时间戳精确对齐。实验结果表明:相较于传统的逐步标定法,该方法的欧几里得距离误差均值降低了 67.73%,具有更佳的外参空间标定性能;相较于探地雷达-轮式编码器和轮式编码器-相机方法,该方法将累积偏移距离误差均值分别降低了 92.81%、97.64%,有效抑制因时序错位导致的轨迹漂移。所提方法能成功的实现探地雷达-相机外参空间标定和时间同步,同时也提高了两类异构传感器数据融合后的整体精度和稳定性。

关键词: 探地雷达;相机;时空标定;镜像反射;距离约束

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A spatiotemporal extrinsic calibration method of ground penetrating radar and camera based on mirror reflection targets and distance constraints

Liu Wanli¹, Huang Jianhui¹, Zhang Xueliang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. China Coal Technology & Engineering Group Coal Industry Planning Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: Extrinsic spatiotemporal calibration is the prerequisite and foundation for the fusion of ground-penetrating radar (GPR) and camera data. However, existing calibration methods suffer from difficult target observation, large error accumulation, and time synchronization issues. To address these problems, this paper proposes a method for the spatiotemporal calibration of ground-penetrating radar-camera external parameters based on mirror reflection targets and distance constraints. This method effectively integrates common targets, mirror coordination, and distance constraint functions, enabling spatiotemporal calibration of GPR-camera external parameters without requiring prior information about the scene. Specifically, firstly, a set of GPR-camera external parameter spatiotemporal calibration device is designed, which indirectly achieves simultaneous observation of the common target sphere by the GPR and camera through the introduction of mirror reflection transformation. Secondly, a global joint optimization method combining Huber kernel function constraints and weighted least squares method is proposed to effectively suppress error accumulation during the calibration process. Finally, a distance constraint function is utilized to synchronize two types of data streams: Camera image information with uniform temporal distribution and GPR/wheel encoder distance information with uniform spatial distribution, achieving precise alignment of

收稿日期: 2026-05-08 Received Date: 2026-05-08

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52274161)、山西省揭榜挂帅重大科技项目(202301010101002)资助

timestamps between the GPR and the camera. The experimental results show that, compared with the traditional step-by-step calibration method, the Euclidean error mean value of the method proposed in this paper is reduced by 67.73%, demonstrating better performance in extrinsic spatial calibration. Compared with the GPR-wheel encoder and wheel encoder-camera methods, the proposed method reduces the mean value of cumulative distance drift error by 92.81% and 97.64% respectively, effectively suppressing trajectory drift caused by temporal misalignment. The proposed method successfully achieves spatial calibration and time synchronization of GPR and camera external parameters, while improving the overall accuracy and stability of data fusion between the two heterogeneous sensors.

Keywords: ground penetrating radar; camera; space-time calibration; mirror reflection; distance constraint

0 引言

在移动机器人领域快速发展的背景下,多传感器融合已成为机器人自主感知与智能检测的重要基础^[1]。目前常用的检测方法是将多传感器放置在移动机器人上获取地面和地下的几何结构信息以此来帮助查找安全隐患^[2]。通过多传感器融合可以有效弥补各个传感器的不足并显著提高系统获取地面和地下全要素信息的能力。如相机可以提供探地雷达无法获取的地面三维场景、表面特征、纹理等信息^[3],而探地雷达则可以解决相机无法穿透地面探测地下空间形态结构的问题^[4]。两类传感器在成像机制及信息维度上具有天然互补性,不仅可以获取地面上的三维空间信息,同时也实现了对地下空间形态的有效探测。

探地雷达和相机数据融合可以有效获取地面和地下的全要素信息,实现一体化的三维建模与可视化分析。但这两类传感器采集的是多源异构数据,存在格式、时间戳、坐标关系等都不相同问题,融合前需要对探地雷达与相机外参的时空关系进行校正,这样才能够准确地实现两传感器之间的数据融合。因此,外参时空标定是探地雷达和相机数据融合的前提和基础^[5]。

探地雷达-相机的外参时空标定一般包括两个方面的内容^[6]:1)外参空间标定:即确定相机坐标系与探地雷达坐标系之间的空间转换关系;2)外参时间同步:即确保两类传感器测量的时间戳对齐。

目前,国内外学者已对多传感器融合的外参时空标定进行了大量的研究,如:Taylor等^[7]提出了一套适用于任何系统由激光雷达、相机和导航传感器构成的校准方法,该方法针对动态环境中的应用,帮助实现更精确的数据融合,从而提升系统在复杂环境中的性能。同时,有学者提出结合同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术进行空间信息数据获取^[8],并将SLAM与其他传感器进行数据融合;Shan等^[9]提出了激光雷达-视觉-惯性测量单元里程计(inertial measurement unit, IMU)紧耦合框架,通过融合激光雷达、IMU与视觉信息,提高了位姿估计精度和对剧烈运动场景的鲁棒性;崔隆基等^[10]提出了一种基于对比度最大化的无靶

标事件相机/IMU旋转外参和时延标定方法,该方法优化了事件相机和IMU的校准过程,无需依赖物理靶标,通过最大化对比度来进行校准,提供了更加高效、准确的解决方案。现如今把如IMU、全球定位系统等融合能获取更全面、更丰富的信息^[11],提高数据的准确性和可靠性^[12]。

总体而言,国内外学者对多传感器外参时空标定的研究主要集中在激光雷达与相机联合^[13-14]、IMU与相机联合^[15-16]等传感器方面,这类方法通常依赖传感器对同一外部几何目标或同一运动过程的共同观测,如利用激光点云与图像特征建立空间约束,或利用IMU运动信息辅助位姿估计。然而针对探地雷达与相机的外参时空标定研究相对较少,目前存在的主要问题有^[17-23]:

1)激光雷达-相机标定通常依赖二者可直接观测的角点或自然场景特征来建立三维点云与二维图像之间的对应关系,而探地雷达-相机标定中探地雷达获取的是地下电磁反射信息,相机获取的是地表视觉图像,二者缺乏可直接共同观测的目标,导致已有激光雷达-相机或IMU-相机标定方法从原理层面就难以直接适用于探地雷达-相机场景;

2)不同于激光雷达-相机系统中较容易通过统一时钟或时间戳插值进行时间对齐,探地雷达和相机的时钟触发机制不同,即探地雷达由轮式编码器触发,而相机是由快门触发,导致探地雷达与相机测量的数据存在时空不同步现象;

3)探地雷达和相机外参标定过程往往需要多次合坐标变换,但每次变换往往会带来一定的误差传递,导致累积误差较大。

为解决以上问题,迫切需要一种既能保证探地雷达与相机外参空间标定的精度和稳定性,又能保证数据在时间上同步的方法来解决以上问题。为此,本文提出一种基于镜像反射靶标与距离约束的探地雷达-相机外参时空标定方法,其创新性主要体现为以下3个方面:

1)设计一套新型探地雷达与相机外参时空联合标定装置,通过引入平面镜的镜像关系间接实现探地雷达与相机同时观测到公共靶球,确保探地雷达与相机在获取方式与物理特性差异显著条件下的同时观测;

2)提出一种基于金属条锚点距离约束来同步两种数

据流的方法(时间均匀分布相机图像信息和空间均匀分布探地雷达/轮式编码器输出距离信息),实现探地雷达与相机外参的时间戳精确对齐;

3) 提出一种融合 Huber 核函数约束与加权最小二乘法的全局联合优化方法,显著抑制外参空间标定过程中误差传递与累积,实现探地雷达与相机亚厘米级精度的外参标定。

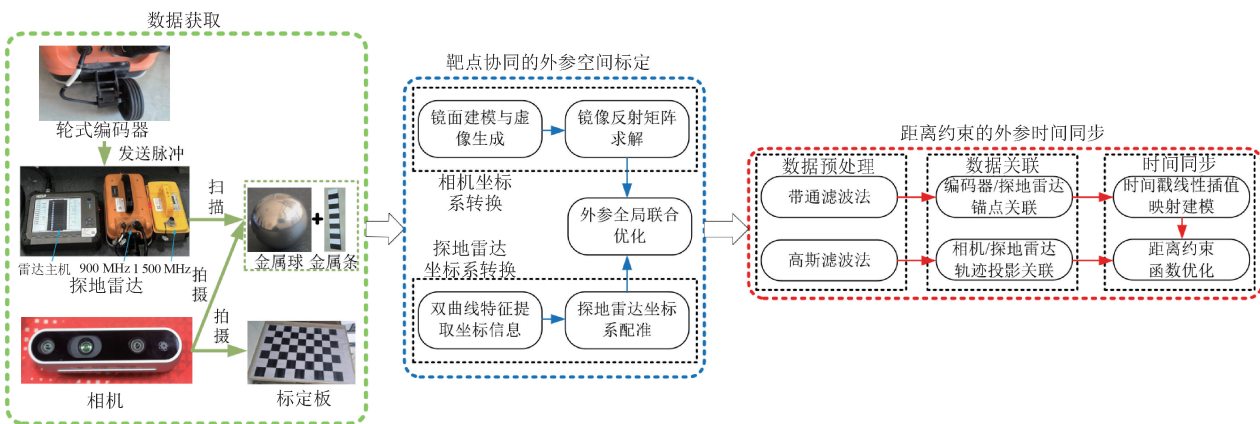


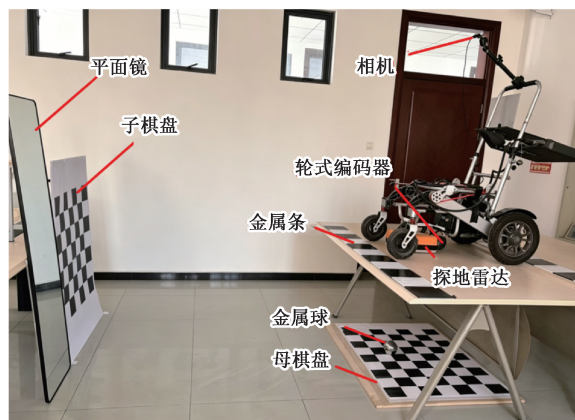
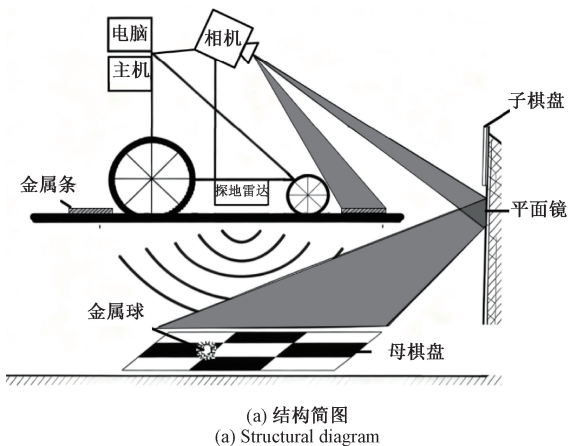
图 1 总体技术框架

Fig. 1 Overall technical framework

1.1 校准装置设计

由于探地雷达主要用于获取介质内部被测目标的电磁反射信息,而相机则只能观测介质外部的视觉图像,导致两者无法同时直接观测到同一目标信息,这为联合标定带来了挑战。在多传感器联合应用中,尤其是探地雷达与相机的组合,必须解决这一时空不一致的问题,从而确保两种传感器的数据能够精准对接、有效融合。

为了解决这一问题,本文设计了一种新型的探地雷达与相机外参标定装置,如图 2 所示。该装置主要由探地雷达、相机、公共靶球、黑白相间的金属条、棋盘格标定板以及平面镜组成。



(b) 实物图
(b) physical object image

图 2 探地雷达与相机外参标定装置

Fig. 2 Ground penetrating radar and camera extrinsic calibration device

标定的第 1 步是在安装有探地雷达与相机的移动小车前放置一个平面镜,通过镜面反射的方式帮助相机间接观测到公共靶球的位置。接下来,在平面镜的上方放置一个子棋盘格标定板(子棋盘),同时在探地雷达下方放置母棋盘格标定板(母棋盘),这两个棋盘的规格参数保持一致,以确保两种传感器获取的图像数据具有相同的几何约束。在母棋盘格角点的位置放

置公共靶球,作为两传感器的共同校准对象。此时,探地雷达可以直接探测到公共靶球,而相机则通过平面镜的反射间接观测到靶球的位置。

第2步,标定过程中会同步使用探地雷达和相机对靶球进行观测,进一步确保两者在共同目标下进行校准。为了实现时间同步,本文利用金属条锚点的距离约束,将两种传感器的数据流进行同步。金属条锚点在标定过程中起到了关键作用,通过精确的距离测量,有效解决了探地雷达与相机之间的时间对齐问题。最终,通过融合镜像反射靶标与距离约束的方法,本研究实现了探地雷达与相机外参的空间标定和时间同步。

1.2 外参时空标定问题描述

探地雷达与相机的外参空间标定问题的数学描述如图3所示。

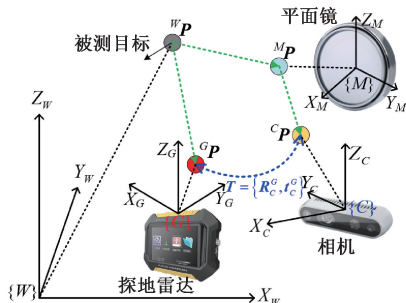


图3 探地雷达与相机外参空间标定原理

Fig. 3 Principle of external parameter space calibration for ground penetrating radar and camera

在探地雷达和相机外参标定过程中涉及到4类坐标系:探地雷达坐标系 $\{G\}$ 、相机坐标系 $\{C\}$ 、镜像坐标系 $\{M\}$ 和世界坐标系 $\{W\}$ 。假设被测目标 P 在坐标系 $\{W\}$ 中可以表示为 wP ,其转换到坐标系 $\{G\}$ 中 ${}^G P$ 如式(1)所示。

$${}^G P = R_G^W \cdot {}^w P + t_G^W \quad (1)$$

式中: R_G^W 和 t_G^W 分别表示从坐标系 $\{G\}$ 到坐标系 $\{W\}$ 的旋转矩阵和平移矩阵。

同理,坐标系 $\{M\}$ 中 ${}^M P$ 转换到坐标系 $\{W\}$ 中 ${}^w P$,以及坐标系 $\{C\}$ 中 ${}^C P$ 转换到坐标系 $\{M\}$ 中 ${}^M P$,如式(2)所示。

$$\begin{cases} {}^w P = R_M^W \cdot {}^M P + t_M^W \\ {}^M P = R_C^M \cdot {}^C P + t_C^M \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_C^M 和 t_C^M 分别表示从坐标系 $\{C\}$ 到坐标系 $\{M\}$ 的旋转矩阵和平移矩阵; R_M^W 和 t_M^W 分别表示从坐标系 $\{M\}$ 到坐标系 $\{W\}$ 的旋转矩阵和平移矩阵。

根据式(1)和(2),可以求得探地雷达坐标系 $\{G\}$ 与相机坐标系 $\{C\}$ 之间的转换关系如式(3)所示。

$${}^G P = R_M^G (R_C^M \cdot (R_C^M \cdot {}^C P + t_C^M) + t_M^W) + t_M^G = R_C^G P + t_C^G \quad (3)$$

式中: R_C^G 和 t_C^G 分别表示坐标系 $\{G\}$ 与坐标系 $\{C\}$ 之间的旋转矩阵和平移矩阵,亦可表示为 $T = \{R_C^G, t_C^G\}$ 即为探地雷达与相机之间外参空间转换矩阵。因此,外参标定的关键在于精确求解 T ,以确保探地雷达与相机数据的空间一致性。

探地雷达与相机的外参时间同步问题的数学描述如图4所示。

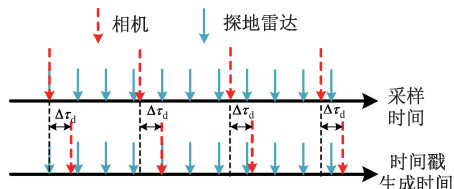


图4 探地雷达与相机外参时间同步原理

Fig. 4 Principle of time synchronization between ground penetrating radar and camera extrinsic parameters

由于两类传感器的采样频率不同,以及会受到不同时钟、触发机制、传输延迟等影响,导致在某一时刻传感器的时间戳不对齐,造成时间不同步现象产生时间偏差 $\Delta\tau_d$ 如式(4)所示,需要对其进行校正即实现 $\Delta\tau_d = 0$ 。

$$\Delta\tau_d = \tau_C - \tau_G \quad (4)$$

式中: τ_C 和 τ_G 分别表示相机和探地雷达的时间戳。

2 探地雷达和相机的数学模型

2.1 探地雷达的数学模型

探地雷达是一种利用电磁波进行地下探测的高分辨率地球物理方法。包含一对发射天线(transmitting antenna, TX)与接收天线(receiving antenna, RX)用于收发雷达信号^[24],TX发射电磁波,电磁波穿透地下介质,当遇到不同介电常数的分层界面时(如空气-地面),电磁波在介质层界面发生反射和折射,通过RX接收来自地下介质的界面反射波来探测被测目标的结构信息。

探地雷达探测金属球时会以双曲线的形式进行呈现,具体工作原理如图5所示。当探地雷达探测到半径为金属球时,扫描图像会显示一条直线(地面响应)和一条双曲线(介质响应),右侧为其探地雷达图像。

将 $\mathbf{x}_k = [L_k, D_k]^T \in Ak$ 定义为双曲线上任意一个点,其中 L_k 为通过轮式编码器测量的从第一个A扫描到第 k 个A扫描探地雷达移动的距离; Ak 为第 k 个A扫描; $D_k = |D(o, k) - D(g, k)|$ 为 Ak 中介质响应与地面响应之间的距离。 $H = \{\mathbf{x}_k | k = 1, 2, \dots, n\}$ 表示双曲线上对应

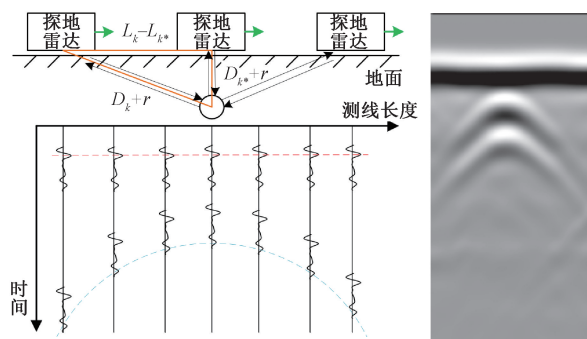


图5 金属球的探地雷达双曲线响应图

Fig. 5 Hyperbolic response diagram of ground penetrating radar for metal balls

金属球的所有点。\$\mathbf{x}_{k^*} = [L_{k^*}, D_{k^*}]^T\$ 为双曲线顶点, 其中 \$k^*\$ 为对应双曲线顶点的 \$A\$ 扫描索引; 当探地雷达移动 \$L_{k^*}\$ 并生成 \$A_{k^*}\$ 时, \$D_{k^*}\$ 为探地雷达到金属球的最小距离。当探地雷达从 \$A_k\$ 移动到 \$A_{k^*}\$ 时, 会得到如图 5 顶部三角形的关系, 具体如式 (5) 所示。

$$(D_k + r)^2 = (D_{k^*} + r)^2 + (L_k - L_{k^*})^2 \quad (5)$$

令 \$\tilde{D}_{k^*} = D_{k^*} + r\$, \$\tilde{D}_k = D_k + r\$, 式 (5) 可转变为如式 (6) 所示的双曲线形式:

$$\tilde{\mathbf{x}}_k^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{x}}_k = 0, \forall \mathbf{x}_k \in H \quad (6)$$

$$\text{式中: } \tilde{\mathbf{x}}_k = [L_k, \tilde{D}_k, 1]^T, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_{k^*} \\ 0 & -1 & 0 \\ -L_{k^*} & 0 & L_{k^*}^2 + \tilde{D}_{k^*}^2 \end{bmatrix}.$$

具有 5 个自由度的一般二次曲线方程为 \$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0\$, 在探地雷达图像中 \$b = e = 0, a = -c = 1\$, 因此减少为两个自由度, 在给定金球半径 \$r\$ 的前提下, 仅靠 \$\{L_{k^*}, D_{k^*}\}\$ 两个参数即可确定双曲线形状。

2.2 相机的数学模型

在相机成像建模中, 针孔相机模型因其结构简明而被广泛采用。该模型清晰地描述了从三维世界到二维图像平面的投影过程, 并明确了多个坐标系之间的转换关系, 如图 6 所示^[25]。

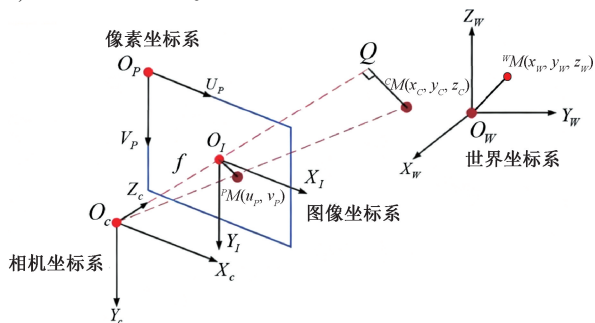


图6 针孔相机成像模型

Fig. 6 Pinhole camera imaging model

成像过程涵盖以下 4 个坐标系之间的转换关系: 世界坐标系 (\$O_w - X_w, Y_w, Z_w\$)、相机坐标系 (\$O_c - X_c, Y_c, Z_c\$)、图像坐标系 (\$O_I - X_I, Y_I\$)、像素坐标系 (\$O_p - U_p, V_p\$), 具体如式 (7) 所示。

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/p_x & 0 & u_o & 0 \\ 0 & f/p_y & v_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{o}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: \$(u_o, v_o)\$ 为相机主点坐标; \$f\$ 为相机焦距; \$p_x, p_y\$ 为单个像素在物理尺寸上的宽和高; \$\mathbf{R}, \mathbf{t}\$ 分别为旋转矩阵和平移矩阵。

为校正由光学镜头引起的非线性畸变, 需引入畸变参数 \$k_1, k_2, k_3, p_1, p_2\$, 对理想图像坐标进行修正。实际图像坐标 \$(x_r, y_r)\$ 与理想图像坐标 \$(x_l, y_l)\$ 之间的关系如式 (8) 所示。

$$\begin{cases} x_r = x_l(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + x_l + 2p_1 x_l y_l + p_2(r^2 + 2x_l^2) \\ y_r = y_l(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + y_l + 2p_2 x_l y_l + p_1(r^2 + 2y_l^2) \\ r^2 = x_l^2 + y_l^2 \end{cases} \quad (8)$$

3 镜像反射靶标的外参空间标定

为确定探地雷达坐标系 \$\{G\}\$ 与相机坐标系 \$\{C\}\$ 之间的空间转换关系, 本文利用金属球作为共同校准靶点进行探地雷达-相机外参联合空间标定。如图 7 所示, 金属球作为公共靶点放置在母棋盘角点的不同位置, 同时采集多组相机和探地雷达扫描数据, 通过这些数据分别估计出公共靶球在相机坐标系 \$\{C\}\$ 和探地雷达坐标系 \$\{G\}\$ 中的位置, 进而求解相机与探地雷达之间的外参空间对应关系。具体内容包括: 相机-平面镜-世界坐标系空间转换关系、探地雷达-世界坐标系空间转换关系、探地雷达与相机外参联合优化。

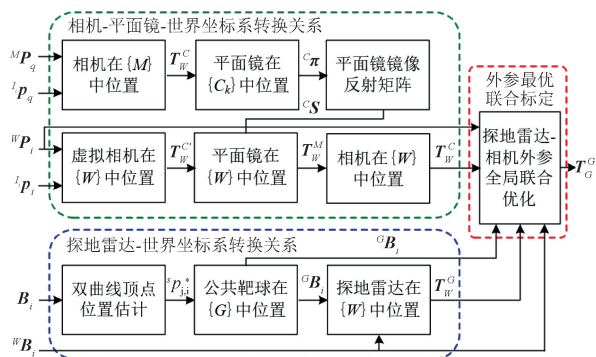


图7 探地雷达-相机外参标定流程

Fig. 7 Ground penetrating radar camera external parameter calibration process diagram

$[\begin{smallmatrix} {}^W\mathbf{x}_i & {}^W\mathbf{y}_i & {}^W\mathbf{z}_i \end{smallmatrix}]^T, {}^G\mathbf{B}_i = [\begin{smallmatrix} {}^G\mathbf{x}_i & {}^G\mathbf{y}_i & {}^G\mathbf{z}_i \end{smallmatrix}]^T$ 。根据 Horn's 方法坐标系 $\{W\}$ 与坐标系 $\{G\}$ 之间的空间转换矩阵

$$\mathbf{T}_W^G = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_W^G & \mathbf{t}_W^G \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{如式(16)所示。}$$

$$\begin{cases} \mathbf{R}_W^G = \Lambda \text{diag}(1, 1, \det(\Lambda \mathbf{U}^T)) \mathbf{U}^T \\ \mathbf{t}_W^G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ({}^W\mathbf{B}_i) - \mathbf{R}_W^G \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ({}^G\mathbf{B}_i) \\ \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{A}^T = \sum_{i=1}^n \left(\left({}^W\mathbf{B}_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ({}^G\mathbf{B}_i) \right) \cdot \left({}^W\mathbf{B}_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ({}^G\mathbf{B}_i)^T \right) \right) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为左奇异向量矩阵, 其列向量构成坐标系 $\{G\}$ 的标准正交基; $\mathbf{\Sigma}$ 为奇异值对角矩阵; $\mathbf{A}$ 为右奇异向量矩阵, 其列向量构成坐标系 $\{W\}$ 的标准正交基。

3.3 探地雷达-相机空间转换及外参优化

1) 探地雷达-相机空间转换关系

根据已经计算出的相机与世界坐标系空间转换矩阵 $\mathbf{T}_M^C$ 、平面镜与世界坐标系的空间转换矩阵 $\mathbf{T}_M^W$ 和探地雷达与世界坐标系空间转换矩阵 $\mathbf{T}_W^G$, 可根据式(3) 来求解探地雷达与相机的空间转换矩阵 $\mathbf{T}_C^G$, 式(3) 转换成矩阵形式如式(17)所示。

$$\begin{bmatrix} {}^G\mathbf{P}_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_C^G \begin{bmatrix} {}^C\mathbf{P}_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_W^G \cdot \mathbf{T}_M^W \cdot \mathbf{T}_M^C \begin{bmatrix} {}^C\mathbf{P}_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{T}_C^G = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_C^G & \mathbf{t}_C^G \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$ 为探地雷达与相机之间空间转换

矩阵; $\mathbf{R}_C^G$ 和 $\mathbf{t}_C^G$ 分别表示旋转矩阵和平移矩阵。

2) 外参全局最优联合优化

由于相机在标定过程中不能直接观测到金属球, 要借助平面镜的镜像反射变换来求解 $\mathbf{T}_M^C$, 以及探地雷达标定过程中要利用双曲线顶点计算金属球中心坐标 ${}^G\mathbf{B}_i$; 两个标定过程互相独立, 会导致误差不断累积增大, 因此, 在外参 $\{\mathbf{R}_C^G, \mathbf{t}_C^G\}$ 求解过程中, 需要对所有标定参数进行全局联合优化。假设全局优化变量集合为: $\Omega = \{\mathbf{T}_W^G, \mathbf{T}_M^W, \mathbf{T}_M^C, \mathbf{T}_W^C, {}^G\mathbf{B}_i, {}^W\mathbf{B}_i\}$, 则 Ω 的全局最优方程如式(18)所示。

$$F = \min_{\Omega} \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^m \omega_{k,j} \rho(\|Y_{k,j}(\Omega)\|_{\Sigma_{k,j}^{-1}}) \quad (18)$$

式中: j 为集合中第 j 次测量值; k 为误差的类别编号 ($k=1, 2, 3$) 具体为: $Y_{1,j}$ 表示相机观测到的图像点与通过镜面镜像得到的估计点之间的误差, $Y_{2,j}$ 为通过探地雷达探测的金属球中心位置与实际位置之间的误差, $Y_{3,j}$ 为测量的世界坐标系中的点(如棋盘格角点)与真实值之间的误差; $\Sigma_{k,j}^{-1}$ 为第 k 类残差第 j 个残差的协方差逆矩阵; $\rho(\cdot)$ 为 Huber 核函数; $\omega_{k,j}$ 为迭代调整权重, 具体如

式(19)与(20)所示。

$$\rho(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{1}{2} \varepsilon^2, & |\varepsilon| \leq \sigma \\ \sigma |\varepsilon| - \frac{1}{2} \sigma^2, & |\varepsilon| > \sigma \end{cases} \quad (19)$$

$$\rho'(\|Y_{k,j}(\Omega)\|_{\Sigma_{k,j}^{-1}}) = \frac{\sum_{j,i}^{-1}}{\|Y_{k,j}(\Omega)\|_{\Sigma_{k,j}^{-1}}} \quad (20)$$

式中: ε 表示 $Y_{k,j}$ 的残差值; σ 是阈值参数; $\rho'(\cdot)$ 为 Huber 核函数的导数。

4 距离约束的外参时间同步

在获得探地雷达与相机的坐标转换关系后, 由于探地雷达和相机的时钟触发机制不同, 即探地雷达由轮式编码器触发, 而相机是由快门触发; 导致探地雷达与相机测量的数据存在时间不同步现象。同时时间不同步误差会进一步转化为沿测线方向的空间偏移误差, 其大小可近似表示为 $\Delta s = v_d \cdot e_r$, 其中 v_d 表示小车移动速度, e_r 表示到达时间残差。经实验测算, 虽然小车移动速度相对较低, 但当到达时间残差达到几十毫秒时, 仍会产生厘米级的空间错位。对于亚厘米级外参标定与数据融合任务而言, 该误差会影响相机图像特征、金属条锚点与探地雷达响应之间的正确关联, 因此需要进行时间同步校正。为保证探地雷达与相机数据流同步, 本文设计了一种新型的人工靶标如图9所示, 它是由黑白相间的金属条构成且能够同时被探地雷达与相机观测到, 确保两种异构传感器数据的时间对齐。

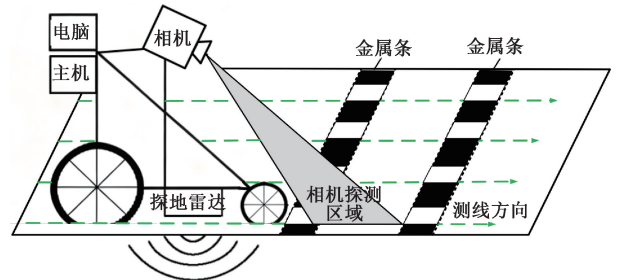


图9 探地雷达与相机时间同步示意图

Fig. 9 Schematic diagram of time synchronization between ground penetrating radar and camera

首先, 在探地雷达与相机公共探测领域放置多块金属条靶标, 并确保每块金属条靶标在地面上均匀分布。然后, 移动小车沿着规划的路径进行移动, 并利用探地雷达与相机分别探测金属条靶标两侧边缘交线信息 $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 。最后, 对齐相机与探地雷达/轮式编码器输出数据之间的时间信息。

如图 10 所示,探地雷达与相机外参时间同步的流程包括 3 个步骤:数据预处理、数据关联和时间同步。

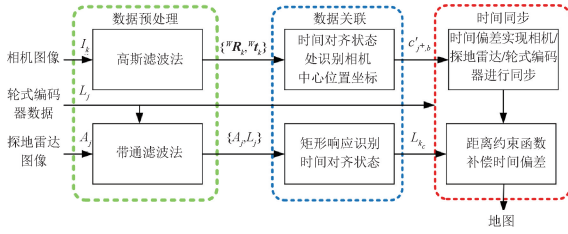


图 10 探地雷达与相机数据时空同步流程

Fig. 10 Process diagram for spatiotemporal synchronization of ground penetrating radar and camera data

4.1 数据预处理

对于相机获取的图像数据 $I_k (k = 1, 2, \dots, N, \text{其中 } N \text{ 表示相机测量总时间序列})$, 本文采取高斯滤波法对 k 时刻相机转换矩阵 $\{^w R_k, ^w t_k\}$ 和获取的金属条靶标锚点位置信息 $\Theta_s (s = 1, 2, \dots, 2n)$ 为金属条靶标上的所有锚点数量进行数据预处理; 以及利用带通滤波法对探地雷达扫描数据和轮式编码器输出数据进行预处理, 并组合标记为 $\{A_j, L_j\} (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

4.2 数据关联

如图 11 所示, 金属条靶标的锚点定义为探地雷达/相机在地面上投影轨迹与金属条黑白间隔线的交点; 相机/探地雷达/轮式编码器 3 个传感器测量时间对齐状态定义为相机中心位置 $^c O$ 、探地雷达坐标原点 $^o O$ 和锚点 Θ_s 3 个点共线且垂直被测表面的时刻状态。

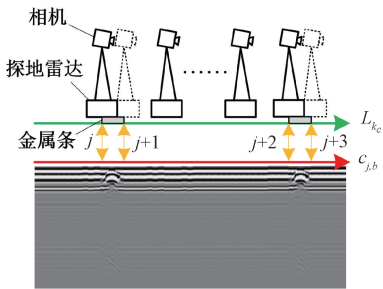


图 11 时间对齐时探地雷达/相机/轮式编码器对应关系图

Fig. 11 Corresponding relationship diagram of ground penetrating radar/camera/wheel encoder during time alignment

探地雷达和相机在测量过程中如果能够始终保持这种状态, 则可以认为探地雷达和相机数据实现了时间对齐。数据关联主要包括以下两部分:

1) 探地雷达与轮式编码器数据关联

探地雷达坐标原点 $^o O$ 行驶至金属条靶正上方时, 会产生强烈的矩形响应, 这时时间对齐状态会出现在金属条边缘处。因此, 本研究利用这种响应特征来实现探

地雷达与轮式编码器的数据关联。

2) 相机与探地雷达/轮式编码器数据关联

根据相机拍摄的高对比度黑白相间图案可以确定金属条锚点在相机坐标系 $\{C\}$ 中位置 $\{^c \theta_s \leftrightarrow ^c \Theta_s\}$, 其中 $^c \theta_s$ 和 $^c \Theta_s$ 分别表示相机坐标系下锚点的二维坐标和三维坐标。根据 $^c \Theta_s$ 可以确定金属条靶标的边缘直线方程, 以及根据相机在序列 k 和 $k+1$ 之间的运动轨迹可以确定其在金属条上投影的轨迹方程, 两条直线的交点即为相机中心位置坐标。因此, 通过以上步骤可以实现相机与探地雷达/轮式编码器的数据关联。

4.3 时间同步

由于探地雷达是由轮式编码器触发, 所以一般认为探地雷达/轮式编码器的时间戳是相等的, 如式 (21) 所示。

$$\tau_1(c) = \frac{N_d \cdot v_d (L_{k_c} - L_{k_1})}{2\pi r_{\text{轮}}} \quad (21)$$

式中: L_{k_1} 为第 1 个金属条起始边缘对应的编码器读数; L_{k_c} 为第 k 金属条边缘对应的编码器读数; $r_{\text{轮}}$ 表示车轮半径; N_d 为轮式编码器周脉冲数; v_d 表示小车移动速度; $c = 1, \dots, 2n$ 表示金属条边缘线的序号, n 表示金属条的数量。

由于在探地雷达和相机探测过程中, 相机帧与探地雷达扫描索引是对应的, 定义 j_0 为第 1 个金属条初始边缘的相机帧索引; c'_{j_0+1} 为第 1 个金属条初始边缘的相机虚拟姿态坐标; c'_{j_0+1} 为 $j_0 + 1$ 索引处的相机真实姿态坐标; 那么从第 1 个金属条初始边缘到当前姿态的移动距离如式 (22) 所示。

$$D(j_c) = \|c'_{j_0+1} - c'_{j_0+1}\| + \sum_{j=j_0+1}^{j_c-1} \|c'_{j+1} - c'_j\| \quad (22)$$

为实现时间同步, 需要建立相机帧索引与探地雷达/轮式编码器时间戳之间的关系。假设相机以恒定帧率 f_c 采集图像, 则相机第 j 帧的时间戳如式 (23) 所示。

$$\tau_c(j) = \frac{j - j_0}{f_c} \quad (23)$$

根据相机与探地雷达/轮式编码器到金属条距离的约束关系, 对式 (4) 采用线性插值法建立相机与探地雷达/轮式编码器时间戳的关系方程, 具体如式 (24) 所示。

$$\Delta\tau_d = |\tau_c(j^+) - \tau_1(c)| = \left| \frac{D(j_c) - (L_{k_c} - L_{k_1})}{L_{k_c} - L_{k_1}} \cdot [\tau_1(c+1) - \tau_1(c)] \right| \quad (24)$$

为保证相机与探地雷达/轮式编码器的时间同步, 需要根据时间偏差 $\Delta\tau_d$ 移动相机的时间序列与探地雷达/轮式编码器对齐, 为此本文引入距离约束代价函数 F 来补偿时间偏差, 包括相机重投影距离约束、轮式编码器距离约束和金属条靶标两端距离约束如式 (25) 所示。

$$F = \argmin \{ {}^C F + {}^E F + {}^A F \} \quad (25)$$

式中: ${}^C F$ 、 ${}^E F$ 和 ${}^A F$ 分别表示相机、轮式编码器和金属条靶标的距离约束代价函数,具体表达式如式(26)所示。

$$\begin{cases} {}^C F = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \alpha_i} |x_{j,i} - \tilde{x}_{j,i}|^2_{\Sigma_{j,i}} \\ {}^E F = \sum_{i=2}^N \frac{[c_j(i) - c_j(i-1)] - [L_k(i) - L_k(i-1)]}{L_k(i) - L_k(i-1)} \\ {}^A F = \sum_{c=1}^{n/2} \cdot \left\| \frac{[D(2j_c) - D(2j_c - 1)] - [L_k(2c) - L_k(2c - 1)]}{L_k(2c) - L_k(2c - 1)} \right\| \end{cases} \quad (26)$$

式中: α_i 为第 i 帧照片相机可见的所有点的集合; N 为相机测量总时间序列; $x_{j,i}$ 为在第 i 张照片中观测到的第 j 个特征点的像素坐标; $\tilde{x}_{j,i}$ 为将被测目标坐标点投影到图像平面的相机投影函数; $\Sigma_{j,i}$ 为 $x_{j,i}$ 的协方差矩阵。

根据式(26),每次优化后,移动后续的时间戳来补偿时间偏移 $\Delta\tau_d$,在随后的数据流中迭代优化并保证 $\Delta\tau_d \approx 0$,最终实现相机与探地雷达/轮式编码器的时间准确同步。

5 实验与分析

实验将在 Ubuntu20.04 操作系统,配备 NVIDIA GeForce RTX 4070 显卡的电脑上进行。实验设备选用 LTD-2600 探地雷达与 Intel RealSense D435i 相机,两者均安装在自主设计的移动推车上。相机内参通过 MATLAB-Camera Calibrator 获取,探地雷达采用剖面法进行测量,选择测距轮控制方式,天线的中心频率为 900 MHz,采样时窗为 40 ns,采样点为 512,测线方向沿水平方向;探地雷达安装在轮式编码器正中央,轮式编码器的水平采样率为 350 脉冲/m(每移动 2.86 mm,发送一次脉冲信息);每个金属条的宽度 0.16 m,长度 1.92 m。

此外,受本文研究目标和实验约束对象限制,IMU 并不适合作为本文时空同步实验的直接对比对象。IMU 主要提供角速度和加速度等运动信息,不能直接观测地下金属球或金属条锚点,因而无法为探地雷达与相机之间的公共观测目标提供直接约束。

5.1 空间标定实验

为验证本文所提方法在空间标定方面的可行性,根据相机与探地雷达原理设计并搭建如图 2 所示标定装置,并且在室内实验室环境进行标定。装置部件尺寸设置如下:金属球与探地雷达垂直距离 $h_i = 750$ mm;金属球直径为 100 mm,母棋盘和子棋盘正方形棋盘格大小为 115 mm。

为了全面地评价实验误差,以下采用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 以及标准差 (standard deviation, STD) 作为统计量,具体如式(27)所示。

$$\begin{cases} \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |X_j - X_T|^2} \\ \text{STD} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2} \end{cases} \quad (27)$$

式中: N 为实验总组数; X_j 为第 j 个待评指标; X_T 为实验真实值; $\bar{X}$ 为样本均值。

总共进行 100 次校准实验,按照 6:4 的比例分为标定集与验证集,每次实验将金属球固定于母棋盘格的唯一顶点位置,装置沿直线匀速扫描。单次实验探地雷达生成 1 张 B 扫描图像,同时相机多角度拍摄金属球生成 20 张相机图像,总共获取 2 000 张相机图像和 100 张探地雷达 B 扫描图像。

选取探地雷达与相机的共同观测对象金属球为校准目标,令世界坐标系下估计的金属球中心位置与实测金属球位置之间的欧几里得距离作为误差度量,如式(28)所示。

$$e_i = \| {}^W S T_c^G B_i - {}^W B_i \| \quad (28)$$

式中: ${}^W B_i$ 来自验证集直接测量得出; ${}^W S$ 和 T_c^G 由标定集估计得出; ${}^G B_i$ 由式(15)计算得出,其中参数来自验证集; e_i 为欧几里得距离,用于衡量估计位置与真实位置之间的绝对位置偏差,因此该评估指标恒为正值。

本实验选择与逐步标定法(即先独立标定相机,再标定探地雷达的传统方法)进行对比,以验证本文所提全局联合优化标定方法在抑制空间外参误差传递方面的有效性与精确性。两种方法在验证集上的误差 e_i 对比结果如图 12 所示。

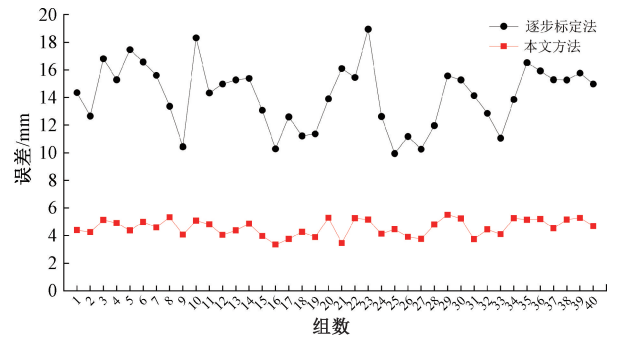


图 12 两种方法在验证集上的误差 e_i 对比

Fig. 12 The error e_i comparison of the two methods on the validation set

由图 12 可知,传统逐步标定法的误差 e_i 均值、RMSE 和 STD 分别为 14.16、14.34 和 2.30 mm;而本文方法的对应指标分别降低至 4.57、4.61 和 0.59 mm。其中,均

值降低了 67.73%,反映本文的外参标定方法的整体标定精度与可行性;RMSE 的显著降低证明了本文方法可有效抑制标定过程中的累积误差;而仅为 0.59 mm 的 STD 则证实了本文方法在多组实验中具有良好的精确性和稳定性。以上结果证明了本文所提的方法能够在统一的全局约束下同步求解空间位姿,有效切断因传感器分步标定造成的误差传递链,并具有较高的空间标定精度。

5.2 时间同步实验

1) 室内模拟巷道场景实验

为进一步定量分析本文方法在时间戳精确对齐方面的性能,引入到达时间残差作为评估标准。通过计算装置到达金属条锚点时,异构传感器观测数据在时间轴上的重合程度,以此证明时间对齐的有效性。

假设在实验场地中布置了 N 个等间距的金属条,当标定装置通过第 j 个金属条锚点时,记录相机观测到金属条特征的时间戳为 $\tau_c(j)$,探地雷达探测到金属条对应矩形响应特征的时间戳为 $\tau_r(j)$ 。

如式(29)所示,定义第 j 个锚点处的到达时间残差 $e_{\tau,j}$ 为:

$$e_{\tau,j} = |(\tau_c(j) - \Delta\tau_d) - \tau_r(j)| \tag{29}$$

如图 13 所示,实验场景为室内模拟巷道,是一段上升坡道,路面平整且无地下介质干扰,为实验提供了较为理想的环境;四面全包围结构较好地模拟了巷道的封闭特性。



图 13 室内模拟巷道场景

Fig. 13 Indoor simulation of roadway scene

在该场景下开展时间戳对齐实验,以验证本文方法在时间戳精确对齐方面的性能(原理见 4.2 节)。采用图 9 所示方式,实验铺设 3 条等间距金属条,单次实验预设 4 条测线,每条测线包含 6 个锚点;为使数据更有代表性,同一金属条同侧的 4 个锚点所计算的到达时间残差取平均值。进行了 3 组实验,优化前后各锚点到达时间残差对比结果见表 1。

表 1 室内模拟巷道场景下优化前后到达时间残差对比
Table 1 Comparison of arrival time residuals before and after optimization in indoor simulated roadway scene

实验组	金属条锚点 编号	优化前到达 时间残差/ms	优化后到达 时间残差/ms
1	1. 1	48. 21	2. 15
	1. 2	51. 34	3. 24
	1. 3	49. 56	2. 56
	1. 4	52. 12	3. 42
	1. 5	47. 88	2. 81
	1. 6	50. 45	2. 38
2	2. 1	53. 20	3. 65
	2. 2	48. 92	2. 92
	2. 3	51. 55	2. 27
	2. 4	49. 14	3. 14
	2. 5	50. 86	2. 75
	2. 6	47. 55	2. 46
3	3. 1	52. 41	3. 51
	3. 2	49. 63	2. 68
	3. 3	51. 18	3. 32
	3. 4	48. 52	2. 88
	3. 5	50. 27	3. 05
	3. 6	51. 75	2. 53

由表 1 可知:优化前到达时间残差的均值为 50.25 ms,优化后降至 2.87 ms,验证了本文方法能够实现探地雷达与相机时间戳的精确对齐。优化后 STD 由 1.67 ms 降至 0.44 ms、RMSE 由 50.28 ms 降至 2.91 ms,其中 RMSE 降幅高达 94.21%,进一步证明本文方法可有效克服因通信延迟与机械抖动造成的时序偏移误差,并具有较高时间对齐精度。

为进一步验证距离约束对定位精度的影响效果,在室内场景下开展定位精度对比实验。该实验对比了 3 组不同方法:探地雷达-轮式编码器、轮式编码器-相机,以及本文方法。实验具体流程如下:

(1) 同样采用图 9 方式,开展 3 组独立实验,每组铺设 3 条等间距金属条,按预布的 4 条测线进行扫描,为使数据更有代表性,同一段金属条距离误差取平均值。

(2) 以金属条的实测物理长度 $d_{AM,i}$ 作为真实基准,计算并对比各方法估计值与该基准之间的累积偏移距离误差,以此定量评估不同方法的定位精度。

定义偏移距离误差度量如式(30)所示:本文方法为 $e_{GWC,i}$;探地雷达-轮式编码器为 $e_{GWC,i}$;轮式编码器-相机为 $e_{WC,i\circ}$

$$\begin{cases} e_{GWC,i} = \sum_{i=1}^{N_i} | \| \mathbf{c}'_{j_0^+,2i} - \mathbf{c}'_{j_0^+,2i-1} \| - d_{AM,i} | \\ e_{GW,i} = \sum_{i=1}^{N_i} | |L_k(2i) - L_k(2i-1)| - d_{AM,i} | \\ e_{WC,i} = \sum_{i=1}^{N_i} | \| \mathbf{c}^*_{j_0^+,2i} - \mathbf{c}^*_{j_0^+,2i-1} \| - d_{AM,i} | \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\mathbf{c}'_{j_0^+,2i}$ 为每段金属条末帧探地雷达虚拟位姿; $\mathbf{c}'_{j_0^+,2i}$ 为每段金属条首帧探地雷达虚拟位姿; $d_{AM,i}$ 为第 i 段金属条实测长度; $\mathbf{c}^*_{j_0^+,2i}$ 为未同步每段金属条末帧探地雷达虚拟位姿; $\mathbf{c}^*_{j_0^+,2i-1}$ 为未同步每段金属条首帧探地雷达虚拟位姿, N_i 为组号。

室内场景下 3 种误差度量对比结果见表 2。

表 2 室内场景下 3 种误差度量对比

Table 2 Comparison of three error metrics in indoor scenes (mm)			
组号 N_i + 金属条序号 i	本文方法	探地雷达-轮式编码器	轮式编码器-相机
1. 1	3. 21	11. 74	21. 40
1. 2	3. 69	12. 34	22. 45
1. 3	2. 65	8. 91	18. 77
2. 1	2. 84	10. 05	20. 87
2. 2	2. 73	9. 64	18. 93
2. 3	2. 79	10. 69	19. 82
3. 1	3. 65	13. 45	20. 96
3. 2	3. 23	12. 89	20. 42
3. 3	2. 92	12. 21	18. 23

定义累积偏移误差为:每个组号 3 个金属条序号偏移距离误差相加。轮式编码器-相机方法累积偏移误差远远高于探地雷达-轮式编码器,说明探地雷达对编码器数据校正的重要性;相较于探地雷达-轮式编码器与轮式编码器-相机,本文方法将累积偏移误差分别减少了 72. 80%、84. 76%,反映本文距离约束方法的定位精度与可行性;RMSE 分别减少了 72. 85%、84. 69%,证明了本文方法处理异构传感器数据具有较好的鲁棒性。

2) 井下模拟巷道场景实验

如图 14 所示,本文同样在井下模拟巷道场景开展了实验验证。该场景为水平平面,光线相较室内更暗,路面分布非均匀砂石,地下介质未知且非均匀,较好地模拟了巷道实际工况环境。

优化前后各锚点到达时间残差对比结果见表 3。为更直观对比室内与井下模拟场景优化结果,绘制两场景到达时间残差对比图(见图 15)。



图 14 井下模拟巷道场景

Fig. 14 Underground simulated roadway scene

表 3 井下模拟巷道场景下优化前后到达时间残差对比

Table 3 Comparison of arrival time residuals before and after optimization in underground simulated roadway scene

实验组	金属条锚点	优化前到达时间残差/ms	优化后到达时间残差/ms
1	1. 1	64. 92	4. 52
	1. 2	61. 65	5. 86
	1. 3	67. 86	3. 94
	1. 4	64. 18	6. 15
	1. 5	66. 74	4. 28
	1. 6	63. 35	5. 55
2	2. 1	69. 62	6. 82
	2. 2	61. 04	4. 12
	2. 3	65. 95	5. 26
	2. 4	68. 78	6. 45
	2. 5	65. 32	4. 88
	2. 6	62. 46	5. 74
3	3. 1	68. 24	4. 35
	3. 2	63. 65	6. 22
	3. 3	70. 85	5. 18
	3. 4	66. 42	6. 65
	3. 5	62. 98	4. 76
	3. 6	67. 35	5. 42

由表 3 可知,与室内场景相比,井下模拟巷道存在地面剧烈起伏、光斑干扰等随机噪声。这些恶劣条件导致误差急剧放大,时间残差起伏显著增加,其均值上升至 65. 63 ms。相比之下,本文引入的金属条锚点方法表现出更强的鲁棒性,在复杂路况下,仍能将残差均值降低至 5. 34 ms。

在砂石打滑与地下介质分布不均路况影响下,探地雷达的空间里程分布极易失调。此时,铺设的金属条靶标作为特征显著的空间参照,为时间对齐提供了可靠的

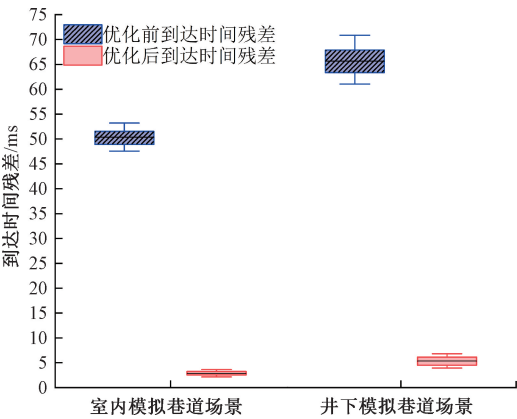


图 15 两种场景到达时间残差对比可视图

Fig. 15 The comparison of the arrival time residuals of the two scenarios can be seen

硬基准,使 RMSE 从 65.69 ms 降低至 5.41 ms,STD 从 2.82 ms 降低至 0.90 ms。图 15 直观显示,优化后时间残差的波动性和离散度大幅下降,证明该方法能有效克服变速和颠簸引起的时序错位与局部畸变,进一步验证了所提方法在井下模拟巷道场景中的有效性与可靠性。

综上,由两种实验场景下的时间同步实验数据可知,优化前到达时间残差均值为 50.25 与 65.63 ms。在实验小车移动速度为 0.3 m/s 的条件下,该时间残差对应的空间偏移距离约为 15.08 与 19.69 mm。经过本文方法校正后,到达时间残差均值降低至 2.87 与 5.34 ms,对应空间偏移距离降低至约 0.86 与 1.60 mm,表明所提时间同步方法能够有效减小异构数据关联误差,提高探地雷达与相机数据融合精度。

井下模拟巷道场景下 3 种误差度量对比结果见表 4。

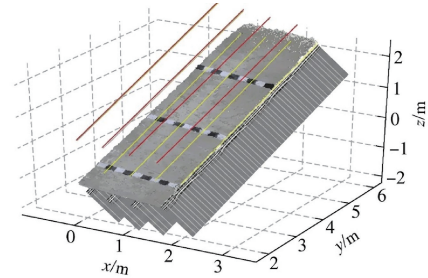
表 4 井下模拟巷道场景下 3 种误差度量对比

Table 4 Comparison of three error metrics in underground simulated roadway scene (mm)			
组号 N_i +金属条序号 i	本文方法	探地雷达-轮式编码器	轮式编码器-相机
1. 1	3.85	28.45	52.14
1. 2	4.32	32.12	58.33
1. 3	3.45	25.66	48.91
2. 1	3.91	30.55	55.42
2. 2	3.66	27.84	50.15
2. 3	3.75	29.31	53.67
3. 1	4.45	35.62	60.88
3. 2	4.10	33.41	57.25
3. 3	3.80	31.05	54.12

由表 4 可知,本文方法累积偏移误差均显著低于其余对比方法。具体而言,相较于探地雷达-轮式编码器、轮式编码器-相机,本文方法累积偏移误差分别减少了 92.81%、97.64%,RMSE 分别减少了 72.89%、84.73%,充分证明在井下模拟巷道此类光源较暗、砂石与地下介质干扰较多场景下,本文方法仍能保持定位精度的精确性和稳定性。

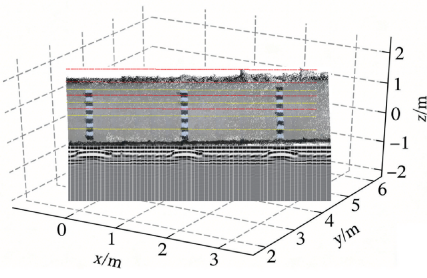
3) 三维重建数据融合结果

为进一步直观地验证本文方法空间标定与时间同步的数据融合性能。选取 Cloud Compare 软件对点云模型进行可视化展示,详细三维重建效果如图 16 所示。



(a) 相机与探地雷达室内场景三维数据融合图

(a) 3D data fusion image of indoor scenes from cameras and ground-penetrating radar



(b) 相机与探地雷达井下模拟巷道场景三维数据融合图

(b) 3D data fusion image of underground simulated tunnel scene captured by camera and ground-penetrating radar

图 16 多传感器三维重建数据融合图

Fig. 16 Multi sensor 3D reconstruction data fusion map

图 16(a)为本文实验部分室内场景,为一段理想工况的上坡路段,图 16(b)为本文实验部分井下模拟场景,为一段暗光、砂石打滑和地下介质未知且分布不均的平面,其中上方 4 条点云相机移动轨迹,下方贴近地面的 4 条点云表示探地雷达移动轨迹,矩形块相间组成的条状物为金属条靶标,下半部分为经时间同步后的探地雷达探测图像,线段表示轮式编码器记录的距离信息。融合结果表明:在两种实验场景下,相机轨迹与探地雷达扫描图均保持了高度的时空一致性,未出现明显的轨迹漂移或数据断裂。常规融合方法在面临视觉特征稀疏与轮子打滑时极易失效,而本文提出的时空标定方法成功克服了这些恶劣工况导致的误差累积,充分证明了系统具备极强的环境适应性与鲁棒性。此外,针对井下模拟巷

道,本文引入的金属条靶标凭借强电磁响应,为异构传感器提供了清晰、稳定的空间参照,基本排除了介质干扰对数据关联的影响。综上所述,本文方法不仅在无需场景先验的前提下实现了高精度标定,更从直观的三维融合层面验证了其保障多源数据时空同步的性能,具备在煤矿井下等复杂场景中应用的可行性。

6 结 论

1) 本文针对现有相机与探地雷达外参标定中存在观测目标难、误差累积大、时间不同步等问题,设计了一种新型的探地雷达与相机外参标定装置,提出了一种基于镜像反射靶标与距离约束的探地雷达-相机外参时空标定方法,该方法可在无需场景先验信息实现亚厘米级精度外参精准标定。该方法首先引入镜像反射变换获取转换矩阵,然后通过一种全局联合优化方法抑制累积误差、优化标定精度,最后通过距离约束同步两传感器数据流。

2) 为验证所提方法的有效性,分别开展了空间标定与时间同步实验。通过金属球的欧几里得距离来验证方法精确性,通过到达时间残差验证时间戳对齐精度,通过累积偏移距离误差验证定位精度性能。实验结果表明:所提方法能成功的实现探地雷达-相机外参空间标定和时间同步,同时也提高了两类异构传感器数据融合后的定位精度和稳定性。

3) 为了能够更好的将本方法用于实际生产,在未来的工作中需要关注:本文实验场景多为直线段,未来将逐步开展为封闭曲线;本文进行外参标定需要装置配合,后续将考虑 IMU 作为中转载体实现两者标定。

参考文献

- [1] 李荣冰,王智奇,廖自威. 激光雷达/MEMS 微惯性组合室内导航算法研究[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(12): 14-17, 21.
Li Rongbing, Wang Zhiqi, Liao Ziwei. Research on LiDAR/MEMS micro-inertial combined indoor navigation algorithm [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(12): 14-17, 21.
- [2] 崔光珍,孙启迪,肖艳秋,等. 基于多传感器融合的城市道路目标检测方法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 193-199.
Cui Guangzhen, Sun Qidi, Xiao Yanqiu, et al. Urban road object detection method based on multi-sensor fusion[J]. Computer Simulation, 2023, 40(10): 193-199.
- [3] 郑少武,李巍华,胡坚耀. 基于激光点云与图像信息融合的交通环境车辆检测[J]. 仪器仪表学报, 2019,

40(12): 143-151.

Zheng Shaowu, Li Weihua, Hu Jianyao. Vehicle detection in traffic environments based on fusion of laser point cloud and image information[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 143-151.

- [4] 晋良念,罗盛耀,熊思宇. 面向道路病害检测的步进频率雷达高分辨成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(10): 384-395.

Jin Liangnian, Luo Shengyao, Xiong Siyu. High-resolution imaging method of stepped-frequency radar for road damage detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(10): 384-395.

- [5] Ou J S, Huang P L, Zhou J, et al. Automatic extrinsic calibration of 3D LiDAR and multi-cameras based on graph optimization[J]. Sensors, 2022, 22(6): 2221.

- [6] Chou C, Li H F, Song D Z. Encoder-camera-ground penetrating radar sensor fusion: Bimodal calibration and subsurface mapping[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 37(1): 67-81.

- [7] Taylor Z, Nieto J. Motion-based calibration of multimodal sensor arrays[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015: 4843-4850.

- [8] 蔺小虎,杨鑫,姚顽强,等. 面向复杂地下空间的多源传感器数据动态加权融合 SLAM 方法[J]. 测绘学报, 2025, 54(3): 523-535.

Lin Xiaohu, Yang Xin, Yao Wanqiang, et al. Dynamic weighted fusion SLAM method for multi-source sensor data in complex underground space[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2025, 54(3): 523-535.

- [9] Shan T X, Englot B, Ratti C, et al. LVI-SAM: Tightly-coupled lidar-visual-inertial odometry via smoot-hing and mapping[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021: 5692-5698.

- [10] 崔隆基,李星星,李圣雨. 基于原始事件流的事件相机/IMU 时空标定[J]. 导航定位与授时, 2025, 12(4): 27-38.

Cui Longji, Li Xingxing, Li Shengyu. Spatiotemporal calibration of event camera and IMU based on raw event stream[J]. Navigation Positioning and Timing, 2025, 12(4): 27-38.

- [11] 胡青松,李敬雯,张元生,等. 面向矿井无人驾驶的 IMU 与激光雷达融合 SLAM 技术[J]. 工矿自动化, 2024, 50(10): 21-28.

- Hu Qingsong, Li Jingwen, Zhang Yuansheng, et al. IMU and LiDAR fusion SLAM technology for unmanned driving in mines[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(10): 21-28.
- [12] 刘敬东, 李旭, 于凤启, 等. 激光 SLAM 技术在巷道精细建模的应用研究[J]. 煤矿机械, 2024, 45(10): 199-202.
- Liu Jingdong, Li Xu, Yu Fengqi, et al. Research on application of laser SLAM technology in fine modeling of roadway[J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45(10): 199-202.
- [13] 魏超, 吴西涛, 朱耿霆, 等. 基于视觉相机和激光雷达融合的无人车障碍物检测与跟踪研究[J]. 机械工程学报, 2025, 61(2): 296-309, 320.
- Wei Chao, Wu Xitao, Zhu Gengting, et al. Research on obstacle detection and tracking for unmanned vehicles based on fusion of vision camera and LiDAR[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(2): 296-309, 320.
- [14] 刘万里, 刘扬, 张学亮. 融合互信息和多特征约束的激光雷达与相机外参标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 29-41.
- Liu Wanli, Liu Yang, Zhang Xueliang. Extrinsic calibration method for LiDAR and camera based on mutual information and multi-feature constraints[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(1): 29-41.
- [15] 张彧, 檀祖冰, 曹东璞, 等. 基于视觉和惯性测量单元的里程计关键技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(10): 3-21.
- Zhang Yu, Tan Zubing, Cao Dongpu, et al. Key technologies of odometry based on vision and inertial measurement unit: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(10): 3-21.
- [16] 王鑫, 李伟, 梁炜, 等. 单目相机-IMU-机械臂的空间联合标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 221-231.
- Wang Xin, Li Wei, Liang Wei, et al. A space joint calibration method of monocular camera-IMU-manipulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 221-231.
- [17] 高强, 陆科帆, 吉月辉, 等. 多传感器融合 SLAM 研究综述[J]. 现代雷达, 2024, 46(8): 29-39.
- Gao Qiang, Lu Kefan, Ji Yuehui, et al. Survey on the research of multi-sensor fusion SLAM[J]. Modern Radar, 2024, 46(8): 29-39.
- [18] 徐中华, 张鑫, 付信凯, 等. SLAM 技术在矿井智能化的研究现状与应用进展[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 294-304.
- Xu Zhonghua, Zhang Xin, Fu Xinkai, et al. Research status and application progress of SLAM technology in mine intelligence[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 41(3): 294-304.
- [19] 李雪强, 李建胜, 王安成, 等. 视觉/惯性/UWB 组合导航技术综述[J]. 测绘科学, 2023, 48(6): 49-58.
- Li Xueqiang, Li Jiansheng, Wang Ancheng, et al. A review of integrated navigation technology based on visual/inertial/UWB fusion[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(6): 49-58.
- [20] 彭湃, 耿可可, 殷国栋, 等. 基于传感器融合里程计的相机与激光雷达自动重标定方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 206-214.
- Peng Pai, Geng Keke, Yin Guodong, et al. Automatic recalibration method for camera and LiDAR using sensor fusion odometry[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(20): 206-214.
- [21] 班喜程, 马继瑞, 尤波, 等. 多传感器信息约束下基于因子图优化的无人车紧耦合 SLAM 方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(10): 356-370.
- Ban Xicheng, Ma Jirui, You Bo, et al. Tightly-coupled SLAM method for unmanned ground vehicles based on factor graph optimization with multi-sensor information constraints[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(10): 356-370.
- [22] 刘秋骅, 徐晓苏. 基于双目相机深度估计的相机-LiDAR 端到端外参标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(5): 214-225.
- Liu Qiuhua, Xu Xiaosu. End-to-end camera-LiDAR extrinsic calibration method based on stereo camera depth estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(5): 214-225.
- [23] 陈孟元, 陈俊, 唐哲, 等. 动态遮挡场景下一种改进 Oneformer 分割网络的 VSLAM 算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(12): 229-238.
- Chen Mengyuan, Chen Jun, Tang Zhe, et al. Improved

VSLAM algorithm for Oneformer segmentation networks in dynamic occlusion scenarios [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(12): 229-238.

[24] 苗曙光, 刘晓文, 李淮江, 等. 基于探地雷达的煤岩界面探测数据解释方法 [J]. 工矿自动化, 2019, 45(1): 35-39.

Miao Shuguang, Liu Xiaowen, Li Huaijiang, et al. Data interpretation method for coal-rock interface detection based on ground penetrating radar [J]. Journal of Mine Automation, 2019, 45(1): 35-39.

[25] 关振长, 陈东, 徐铭泽, 等. 基于双目视觉的管片错台精确测量方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(7): 1359-1367.

Guan Zhenchang, Chen Dong, Xu Mingze, et al. Accurate measurement method for segment dislocation using binocular vision [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2025, 65(7): 1359-1367.

作者简介



E-mail: 4830@cumt.edu.cn

Liu Wanli received his B.Sc. degree and M.Sc degree both from Henan Polytechnic University in 2003 and 2006,

2003 年于河南理工大学获得学士学位, 2006 年于河南理工大学获得硕士学位, 2009 年于天津大学获得博士学位, 现为中国矿业大学教授, 主要研究方向为多传感器融合技术。

respectively, and received his Ph.D. degree from Tianjin University in 2009. He is currently a professor at China University of Mining and Technology. His main research interest includes multi-sensor fusion technology.



Huang Jianhui (Correspondence author) received his B.Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2024. He is currently a postgraduate student of China University of Mining and Technology. His main research interest includes the external calibration of ground penetrating radar and camera.



E-mail: zhang123xp@aliyun.com

Zhang Xueliang received his B.Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2007, and his M.Sc. degree from China Coal Research Institute in 2010. He is currently the director of the Institute of Digital Economy, Digital and Economic Branch of CCTEG Coal Industry Planning and Design Research Institute Co., Ltd. His main research interest includes intelligent mining and digital economy.

黄建辉 (通信作者), 2024 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为中国矿业大学硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达与相机的外参标定。
E-mail: jh2095400978@163.com

张学亮, 2007 年于山东科技大学获得学士学位, 2010 年于煤炭科学研究总院获得硕士学位, 现为煤炭工业规划设计研究院有限公司数字与经济分院数字经济所所长, 主要研究方向为智能采矿与数字经济。