

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306834

大型封闭空间中 UWB 定位基站拓扑的通用设计方法*

钟映春 田志豪

(广东工业大学自动化学院 广州 510006)

摘要:超宽带 (ultra-wide band, UWB) 技术是无人装备在巡检具有多障碍物的大型封闭空间时获取定位坐标的主要方法之一。目前主要依赖人工方式设计 UWB 定位基站拓扑的构型、位置和数量。这种方式存在设计效率低下,设计效果未知,性价比难以确定等问题。为此,本文提出了一套较为科学完善的定位基站拓扑评价体系,并提出了一种在大型封闭空间中自动设计定位基站拓扑的通用方法。该方法以仿真模拟为基础,通过遗传算法结合拓扑评价体系,自动生成贴合实际应用场景的最优拓扑方案,包括最优的基站布设数量以及布设位置信息。实验结果表明:1) 经通用设计方法生成的拓扑相比使用基站数量最多的拓扑,综合性能提高了 6.2%; 相比使用基站数量最少的拓扑,综合性能提高了 21.2%。2) 经通用设计方法生成的拓扑相比人工设计的锯齿形拓扑,综合性能提高了 11.4%,设计效率提高了 92.9%。可见,针对具有多障碍物的大型封闭空间场景,本文的方法可以在较短的时间内设计出综合性能较优,性价比较高的定位基站拓扑,为无人装备在此类大型封闭空间中开展全自主定位和巡检奠定了基础。

关键词:大型封闭空间;超宽带;基站拓扑;自动设计

中图分类号: TP309 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Universal design approach for UWB localization base station topology in large enclosed spaces

Zhong Yingchun Tian Zhihao

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: UWB (Ultra-Wide Band, UWB) technology is one of the main approaches for obtaining the location coordinates of unmanned equipment while inspecting in large enclosed spaces with multiple obstacles. Currently, the design of UWB location base stations topology mainly relies on manual methods, which have many shortcomings such as low design efficiency, unknown design effect, and difficult determination of cost-effectiveness. To address these issues, this paper proposes a scientific and complete topological evaluation system of UWB location base stations, and a universal automated design method for the topology of UWB location base stations in large enclosed spaces. The method is based on simulation, genetic algorithm and topological evaluation system to automatically generate the optimal topology scheme suitable for practical application scenarios, including the optimal number and location information of base stations. The experimental results show that: 1) The topology generated by the universal design approach has a better comprehensive performance than the topology with the largest number of base stations, with an increase of 6.2% in overall performance; it also has a better comprehensive performance than the topology with the smallest number of base stations, with an increase of 21.2% in overall performance. 2) The topology generated by the universal design method has a better comprehensive performance than the serrated topology designed by humans, with an increase of 11.4% in overall performance and a design efficiency increase of 92.9%. Therefore, for the scenario of multiple obstacles in large enclosed spaces, the approach proposed in this paper can design a topology with better overall performance and higher cost-effectiveness in a shorter time, providing a foundation for unmanned equipment to conduct autonomous patrols and inspections in such large enclosed spaces.

Keywords: large enclosed spaces; UWB; positioning base station topology; automatic design

收稿日期: 2023-08-18 Received Date: 2023-08-18

* 基金项目: 国家自然科学基金(61975248)、广州市科技计划项目(202007040004)资助

0 引言

大型封闭空间包括地下仓库、大型货架式仓库等。为了节省人工、提高效率,各种无人装备逐步应用于巡检大型封闭空间,以实现全自主巡检。由于大型封闭空间的场景中,普遍存在 GPS/RTK 信号弱、光照效果不佳等情况,无人装备在巡检大型封闭空间时普遍采用 UWB 技术获取定位坐标^[1]。UWB 定位技术具有厘米级的定位精度和较强的穿透能力等特点,比较适合含有较多障碍物大型封闭空间获取定位坐标。采用 UWB 技术获取定位坐标需要在大型封闭空间的某些位置布局若干个由 UWB 定位基站构成的基站拓扑,而后 UWB 标签通过与基站拓扑的通信计算出定位坐标^[2]。在大型封闭空间中如何布局基站拓扑的位置和数量对于定位坐标的精度具有决定性影响。

常见的需要布设基站拓扑的定位技术除了 UWB 外,还有 WiFi^[3]、红外线^[4]、ZigBee^[5]和蓝牙^[6]技术。但这几种技术的缺点都是穿透性较差且定位精度较低,并不适用于有高精度定位需求的复杂环境中。

针对 UWB 定位基站的拓扑研究,Bharadwaj 等^[7-8]研究了 L 型和镜像两种基站阵型对定位精度的影响,并引入 GDOP (geometric dilution of precision) 用于评价 UWB 基站拓扑。王雪延^[9]采用基于发射与接收信号波形的方法和 CIR 峰值检测法研究室内环境下 UWB 基站配置对定位精度的影响。两种方法均得到了较为理想的结果,但仅是对几种典型的基站阵型进行研究,未提出基站拓扑优化的方法。王川阳等^[10]使用 4 种基站拓扑对 DOP (dilution of precision) 的分布和 DOP 与基站拓扑的关系进行研究,区别于前面仅对静态标签的研究,对动态的标签也进行了定位实验。Zhang 等^[11]对多种 DOP 进行加权求和后作为优化目标,采用基于最大凸包的方法求得最佳基站拓扑,对多种 DOP 进行了加权求和并给出了基站拓扑优化的方法。钟佳威^[12]提出用位置精度稀释因子 (position dilution of precision, PDOP)、覆盖冗余度和基站节点密度作为评价指标,利用遗传算法求解空间中近似全局最优的基站位置。陈兆^[13]以 CRB (cramér-rao bound)、PDOP 和 TDOA (time difference of arrival) 测量误差作为评价指标,建立基站布设优化数学模型,分别通过遗传算法和萤火虫算法求解出最优的基站拓扑。实验表明优化后的基站拓扑相较于传统的立方体 8 基站拓扑具有更好的平均误差和方差。但文献^[12-13]都没有对基站数量进行优化,也未考虑空间中存在障碍物的情况,提出的设计方法仅使用于空旷的室内环境。胡鹏军^[14]根据基站几何布局对定位精度的影响,选择了矩形基站布局,提

出自适应最小二乘定位算法,但该方法不适用于大型的含障碍物空间。周海俊^[15]通过场景的几何建模,选取融合定位算法结合定位误差作为评价指标,利用遗传算法优化求取局部最优基站布局,但单一的评价指标难以寻求能满足实际应用需求且有较高性价比的基站拓扑方案。

当前主要依赖人工设计基站拓扑的构型、位置和数量,存在设计效率低下,设计效果未知,性价比难以确定等问题。为此,本文提出一种适用于大型复杂场景中 UWB 定位基站拓扑的通用设计方法。主要包括根据应用场景提取网格信息点、基于评价指标的目标函数构建以及利用遗传算法生成最佳基站拓扑。

1 架构设计

本文提出的 UWB 定位基站拓扑的通用设计方法的研究架构如图 1 所示。从图 1 可见,研究架构可以分为四个部分:输入变量的初始化、目标函数的模型构建、算法优化生成基站拓扑、对比与分析。

输入变量的初始化,即对影响基站拓扑设计的输入参数(场景条件和巡检方案)进行网格化处理。场景条件包括应用的大型空间参数和障碍物位置信息,巡检方案包括要使用的基站拓扑方案和无人装备的巡检路线。通过合理的初始化,为后续的优化过程提供了合适的起点,确保了设计的灵活性和适应性。

目标函数的模型构建,即研究建立一个目标函数的数学模型,通过该模型反映在大型封闭空间下基站拓扑的性能要求。评价指标主要有定位误差、克拉美罗界^[16-17](CRB)、位置精度稀释因子^[18](PDOP)和部署成本,其中定位误差包括采用 TOF^[19](Time of Flight)测距法产生的误差和由金属干扰产生的误差。通过明确定义目标函数,研究能够对设计的方向进行量化和优化。通过目标函数的计算即可获得当前定位方案的系统收益,用于后续进行对比分析。

算法优化生成基站拓扑,即采用遗传算法根据目标函数搜索最佳的基站拓扑方案,包括基站布设数量和位置信息。这一关键步骤的设计考虑了算法的有效性、收敛性以及具有多障碍物的大型封闭空间场景的适应性。

对比与分析,包括最佳优化拓扑方案与使用最多基站方案、最少基站方案的对比,以及人工设计方案和算法优化方案的对比分析。对比与分析的目的是验证通用设计方法的优越性,突出其在大型封闭空间场景下的性能优势。

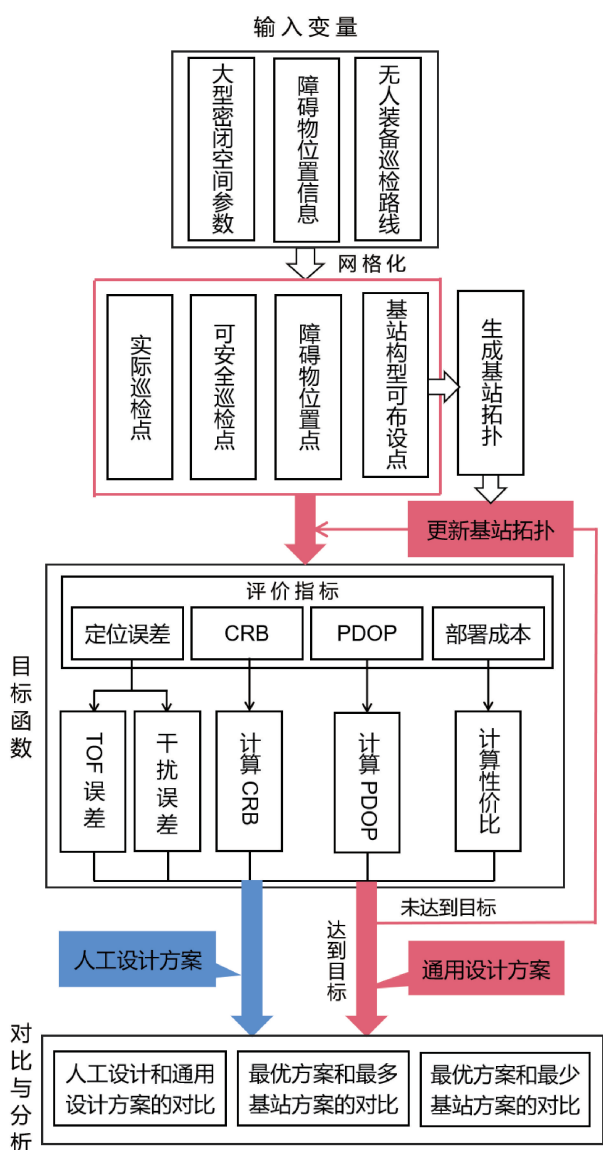


图 1 研究架构

Fig. 1 Research framework

2 输入场景基本信息并网格化

2.1 场景条件

应用案例为湖南长沙某物流中心的大型货架式仓储如图 2 所示。其采用 UWB 定位技术进行无人机巡检。

该场景特点是采用开放式高层金属货架排列,位置相对集中且货架摆放密度较大。

根据仓库的长宽、面积以及货架和其他障碍物摆放的位置等空间参数即可确定系统的场景条件。

2.2 巡检方案设计

根据场景条件,即可设计 UWB 定位基站的部署方案

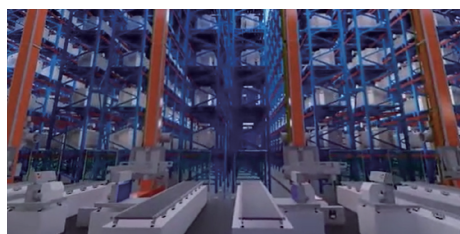


图 2 货架仓库

Fig. 2 Shelf warehouse

和拟定无人机的巡检路线。仓储中的货物摆放密集,通道狭窄,因此采用 2 m×2 m 矩形的基站构型作为布设单位。矩形的基站构型由 4 个定位基站为顶点所围成的矩形区域构成,将这 4 个基站构成的区域定义为一个定位单元。以该单元为中心,半径为 60 m 的范围内可以达到 25 cm 的定位精度。以人工设计的锯齿形布局和巡检路线为例,可表示成图 3(b) 所示。

2.3 网格化处理

网格化处理,即将仓库的场景条件和巡检方案转化为具体的变量数据,可划分为无人机可飞行点、障碍物点、基站构型可布设点、巡检路线点以及使用的基站拓扑方案对应的基站拓扑布设域。经处理后,根据输入变量数据绘制仓库的网格信息点如图 3(c) 所示。

3 自动生成定位基站拓扑

完成对输入变量的网格信息点的求取后,即可通过设定 UWB 基站拓扑方案的评价指标,构建能反映拓朴性能的目标函数,利用遗传算法优化拓朴结构来生成场景下的最佳基站拓扑。

3.1 评价指标的设定

考虑到大型封闭空间中进行无人装备巡检的实际需求,设定评价指标为:定位误差、CRB、PDOP 和部署成本。

定位误差是定位系统性能的核心指标,直接影响着实际应用中的定位准确性。定位误差包括测距误差和金属干扰误差,测距误差指的是采用 TOF 测距法产生的误差,而金属干扰误差考虑的则是空间中金属物对传感器产生的干扰误差。

CRB 是一种测量参数估计精度的统计工具,通过考虑测量误差和信号强度,它提供了对定位误差的理论下界。设定此指标表明了系统参数估计的准确性的严格标准,有助于保证在各种条件下获得可靠的位置信息。

PDOP 表示了基站位置的几何分布的合理性,较低的 PDOP 值表示分布较好。设定 PDOP 的目的在于确保系统系统在不同环境下的位置解算性能。这有助于提供系统在复杂场景中的可用性。

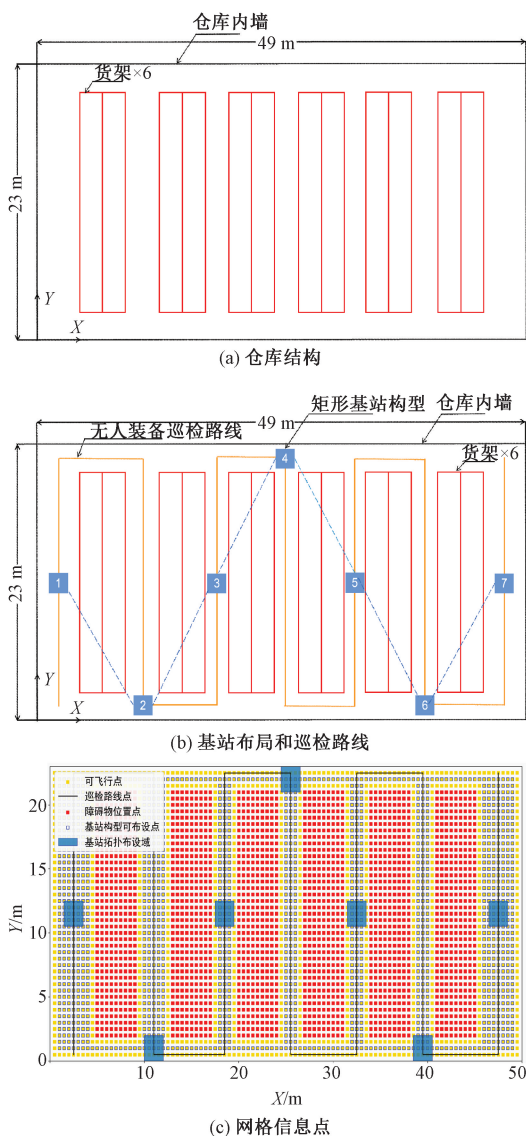


图 3 仓库结构及输入信息点

Fig. 3 Warehouse structure and input information

部署成本是决定系统可行性和实际应用可能性的重要因素。设定部署成本的考虑是为了确保系统在性能卓越的同时,仍然是经济可行的选择。

1) 定位误差

在室内定位中,定位误差的主要来源是时间测量误差(即测距误差),这种测距误差是由物理测量、NLOS 和多径效应等原因造成的,设该测距误差为 γ_1 。由于 UWB 信号对金属材料的穿透性几乎为零,而仓储中大量的金属货架会对 UWB 通信产生干扰,因此还需要考虑由金属干扰产生的误差 γ_2 。 γ_1 和 γ_2 的值将通过采集实际的定位数据进行分析、拟合生成概率模型来获取。总的定位误差 γ 可为测距误差 γ_1 和干扰误差 γ_2 之和。

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \tag{1}$$

2) 克拉美罗界

克拉美罗界(CRB)定义为任意无偏估计量的方差确定了一个下限,如式(1)所示。

$$CRB = \left[\frac{1}{I(\theta)} \right]_{ii} \leq \text{var}(\hat{\theta}_i) \tag{2}$$

其中, $\hat{\theta}_i$ 是估计参数 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n]$ 的无偏估计, $I(\theta)$ 是 $n \times n$ 的 fisher 信息矩阵,表示如下。

$$[I(\theta)]_{ij} = -E \left[\frac{\partial^2 \ln p(x, \theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right] \tag{3}$$

其中, $i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。 $p(x, \theta)$ 是似然函数, $E[\cdot]$ 是指期望值,则噪声模型的 fisher 信息矩阵可表示为:

$$I(\theta) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \frac{(x - x_i)^2}{\sigma_i^2 d_i^2} & \sum_{i=1}^N \frac{(x - x_i)(y - y_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} \\ \sum_{i=1}^N \frac{(x - x_i)(y - y_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} & \sum_{i=1}^N \frac{(y - y_i)^2}{\sigma_i^2 d_i^2} \end{bmatrix} \tag{4}$$

(x, y) 为标签所在的坐标位置, (x_i, y_i) 为第 i 个基站所在的坐标位置, d_i 为标签到第 i 个基站的距离。

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \tag{5}$$

估计距离可表达为:

$$\hat{d}_i = d_i + n_i \tag{6}$$

其中 $n_i \sim N(0, \sigma_i^2)$ 为具有恒定标准差 σ_i 的加性高斯白噪声。

综上所述,可得估计方差之和为:

$$E[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] \geq \frac{1}{[I(\theta)]_{11}} + \frac{1}{[I(\theta)]_{22}} \tag{7}$$

CRB 为误差的方差设定了下限,而方差则是度量误差的离散程度,因此在全局误差尽可能小的同时,为了保证误差的波动性较小,也需要平均 CRB 尽可能地小。

3) 位置精度稀释因子

位置精度稀释因子(PDOP)又叫几何定位因子,是指定位系统确定用户所在位置的精确程度或误差。位置精度因子越小,定位精度越高。

PDOP 由水平精度因子 HDOP 和垂直精度因子 VDOP 求得,即:

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} \tag{8}$$

而 HDOP 和 VDOP 则由观测矩阵 H 和权系数矩阵 Q 求得。观测矩阵 H 为:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x}{r_1} & \frac{y_1 - y}{r_1} & \frac{z_1 - z}{r_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_n - x}{r_n} & \frac{y_n - y}{r_n} & \frac{z_n - z}{r_n} \end{bmatrix} \tag{9}$$

其中, (x, y, z) 为标签坐标, (x_n, y_n, z_n) 为第 n 个基站的坐标, r_n 为标签到第 n 个基站的距离。则权系数

矩阵 Q 为:

$$Q = (H^T H)^{-1} = \frac{1}{|H^T H|} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x}{r_i}\right)^2 & - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x}{r_i}\right) \left(\frac{y_i - y}{r_i}\right) & - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x}{r_i}\right) \left(\frac{z_i - z}{r_i}\right) \\ - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x}{r_i}\right) \left(\frac{y_i - y}{r_i}\right) & \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - y}{r_i}\right)^2 & - \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - y}{r_i}\right) \left(\frac{z_i - z}{r_i}\right) \\ \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x}{r_i}\right) \left(\frac{z_i - z}{r_i}\right) & - \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - y}{r_i}\right) \left(\frac{z_i - z}{r_i}\right) & \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i - z}{r_i}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Q 为 3×3 矩阵, 其中 q_{ii} 为 Q 的对角线元素。由权系数矩阵 Q 可得:

$$HDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22}} \quad (11)$$

$$VDOP = \sqrt{q_{33}} \quad (12)$$

$$PDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}} \quad (13)$$

4) 部署成本

考虑到仓库中无人机定位巡检的成本, 在能够满足定位需求的情况下, 应尽可能地减少布设的 UWB 基站数量, 做到节约成本, 追求高性价比。评估性价比的指标通过式 (14) 求取。

$$f_4(N) = c \cdot N \quad (14)$$

其中, c 为常数, 表示 UWB 定位单元数量在性价比计算中的相对重要性; N 为使用的 UWB 定位单元数量, 介于最大数量 \max 和最小数量 \min 之间。

3.2 目标函数的构建

综上, 根据 UWB 部署方案评价指标的设定, 构建目标函数如式 (15) 所示。

$$f(X, Y, N) = w_1 f_1(X, Y) + w_2 f_2(X, Y) + w_3 f_3(X, Y) + w_4 f_4(N) \quad (15)$$

$$f_1(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{1i} + \sum_{i=1}^n \gamma_{2i}}{n} \quad (16)$$

$$f_2(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n CRB_i}{n} \quad (17)$$

$$f_3(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n PDOP_i}{n} \quad (18)$$

其中, $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, X 为无人装备巡检路线中各坐标点 x_1, x_2, \dots, x_n 的集合; $Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_k)$, Y 为各 UWB 定位单元的布设坐标点 y_1, y_2, \dots, y_k 的集合。 $f_1(X, Y)$ 为针对定位误差指标设定的子函数, 包括对测距误差和干扰误差的计算; $f_2(X, Y)$ 为计算 CRB 的子函数; $f_3(X, Y)$ 为计算 PDOP 的子函数; $f_4(N)$ 为考虑部署成本设定的子函数。将 $f_1(X, Y), f_2(X, Y), f_3(X, Y), f_4(N)$ 以加权形式相加得到总目标收益函数 $f(X, Y, N)$, $f(X, Y, N)$ 的值代表了定位基站拓扑的综合性能, 包

含了定位精度、稳定性和性价比等因素的考量。 w_1, w_2, w_3, w_4 为各评价指标子函数所占的权重系数。

使用加权求和的方式计算总体收益是为了更全面地反映各个评价指标在整体性能中的相对重要性。这种方法允许为各指标分配适当的权重来简化复杂应用场景中的决策过程, 以便根据项目目标、实际应用需求和优先级来量化它们的贡献。

考虑到定位误差直接关系到系统提供的位置信息的准确性。在定位系统中, 用户最为关注的是准确的位置数据。因此, 赋予该指标最高的权重 2 来强调其在系统性能中的主导地位; 考虑到 CRB 对于理论上的准确性有着重要的指导作用, 给予权重 1 是合理的。考虑到复杂环境中基站的几何配置对定位性能至关重要。因此, 对 PDOP 赋予权重 1; 最后, 部署成本考虑了系统在实际应用中的成本效益。即使系统在性能方面表现良好, 如果成本太高, 可能会限制其广泛应用。因此, 给予部署成本权重 1 表明了对实际应用可行性和经济性的综合考虑。综上所述, 设置 $w_1 : w_2 : w_3 : w_4 = 2 : 1 : 1 : 1$ 。

由于实际应用中巡检路线一般为固定的, 且 UWB 定位单元的布设坐标点个数即使用的定位单元数量 N , 因此可将目标函数简化为式 (19) 所示。

$$f(X) = w_1 f_1(X) + w_2 f_2(X) + w_3 f_3(X) + w_4 f_4(X) \quad (19)$$

3.3 优化基站拓扑方案

考虑到应用场景的搜索空间大, 且空间条件复杂、问题涉及的变量和约束条件较多, 因此选择遗传算法对 UWB 定位基站拓扑进行优化, 获得最优的基站布设数量以及最优的基站布设位置。

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 具有良好的全局搜索能力, 能够在含大量障碍物和基站位置组合的复杂搜索空间中找到较优解^[20]。此外, 遗传算法天然具有并行计算的优势, 可以将不同的染色体分配到不同的计算节点上计算, 因此在大型封闭空间中需要同时优化多个基站位置时, 遗传算法高效的并行计算能力能够显著提升优化过程的效率。

采用遗传算法对大型封闭空间中的 UWB 定位基站拓扑进行优化的流程图如图 4 所示。

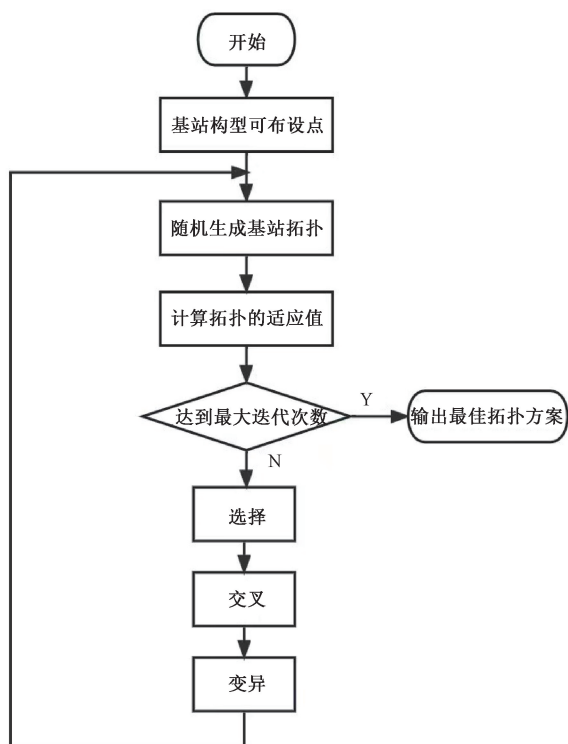


图 4 遗传算法流程图

Fig. 4 Flowchart of genetic algorithm

4 实验及结果分析

4.1 实验环境配置

大型封闭空间中 UWB 定位拓扑设计的软件平台: PyCharm Community Edition 2022. 2. 3 x64。UWB 模块的软件开发平台: Keil uVision5。操作系统: Win10-64 Bit。

采集 UWB 数据使用的硬件平台: 广州联网科技 D-DWM-PG2.5 的 UWB 模块(基于 DW1000, 采用 32F103 芯片, 测距精度为 ± 5 cm), 以及 3~6.5 GHz 低色散、圆极化 UWB 定位天线, 如图 5 所示。

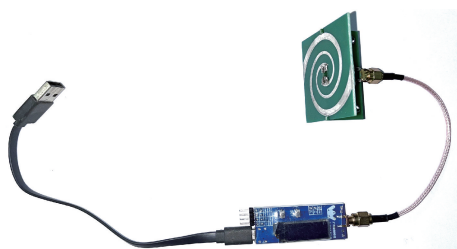


图 5 UWB 模块和天线

Fig. 5 UWB sensor and antenna

4.2 实验方案设计

1) 实验一目的: 通过实物实验采集常态以及受金属干扰环境下的 UWB 定位数据, 构建定位误差的概率

模型。

2) 实验二目的: 根据通用设计方法优化生成采用不同定位单元数量的性能较优的基站拓扑方案。

3) 实验三目的: 性能实验, 即: 对比人工设计拓扑和通用设计方法所生成的优化拓扑的性能和设计效率, 这里的设计效率指根据场景条件, 在较短时间内设计出定位基站拓扑的能力。

4) 实验四目的: 泛化性实验, 即: 将用本文方法设计具有不规则外形轮廓的大型封闭仓储的基站拓扑, 验证本文方法的泛化性。

4.3 实验结果与分析

1) 实验一: 构建定位误差概率模型

以定位单元的中心坐标点为原点, 在原点周围 900 m^2 ($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$) 的正方形区域内均匀采样 200 个位置点, 每个位置点至少记录 500 组定位数据。由定位数据可计算出误差数据, 对误差数据做概率拟合处理并分析各位置点的误差概率模型, 发现拟合结果具有一定的分布规律, 如图 6 所示。

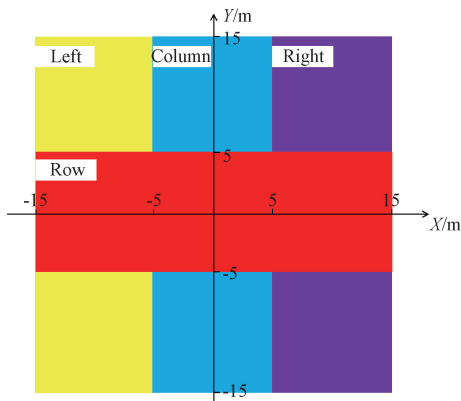


图 6 拟合模型分布图

Fig. 6 Fit model distribution diagram

通过整理、分析不同位置误差数据的概率拟合结果发现, 在图 6 中相同颜色的区域往往具有相同的概率模型, 因此为了降低计算复杂度, 可将数据按照图 6 整合、划分成 Row、Column、Left、Right 四个区域后再做拟合处理。拟合结果如表 1 所示, 各区域的最佳拟合模型及参数如表 2 所示, 拟合直方图如图 7 所示。

从表 1 可见, 以和方差作为拟合指标, 结果保留了各区域 3 种效果最好的分布模型, 实际使用效果最优模型, 和方差均在 0.0069 以下。根据拟合的分布模型及参数即可确定不同区域的概率密度函数, 由该函数便能模拟生成 UWB 定位产生的测距误差 γ_1 。

同样, 采集在金属干扰环境下的数据进行拟合分析, 生成相应的概率密度函数即可模拟由金属干扰产生的误差 γ_2 。

表 1 定位误差数据的拟合结果

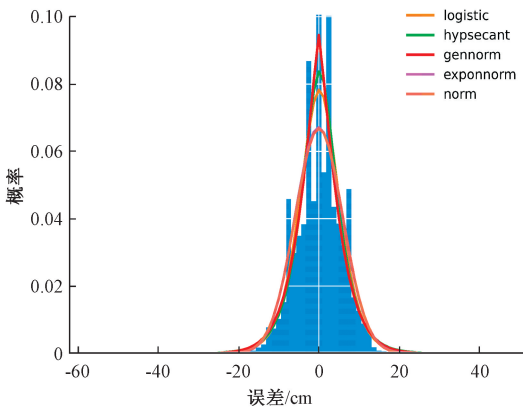
Table 1 The fitting results of positioning error data

	Row		Column		Left		Right	
	分布模型	和方差	分布模型	和方差	分布模型	和方差	分布模型	和方差
x 坐标误差数据的拟合结果	norminvgauss	0.004 028	logistic	0.004 947	logistic	0.002 363	norm	0.002 652
	burr	0.004 028	hypsecant	0.005 069	hypsecant	0.002 428	logistic	0.002 890
	dweibull	0.004 126	gennorm	0.005 216	norm	0.002 783	gumbel_l	0.003 130
y 坐标误差数据的拟合结果	hypsecant	0.006 873	norm	0.003 817	norm	0.000 166	norm	0.003 193
	logistic	0.006 874	logistic	0.004 383	logistic	0.000 490	logistic	0.003 397
	laplace	0.007 004	gumbel_r	0.005 072	gumbel_l	0.001 998	gumbel_l	0.004 595

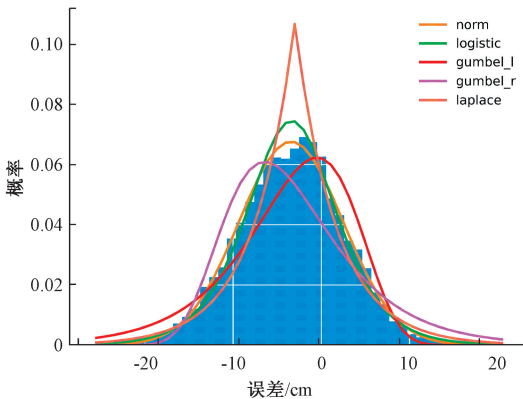
表 2 定位误差数据的最佳拟合模型及参数

Table 2 The best fitting model and parameters of positioning error data

	区域	最佳模型	模型参数
	x 坐标误差数据的最佳拟合模型及参数	Row	norminvgauss
Column		logistic	'loc': 0.1882, 'scale': 3.1925
Left		logistic	'loc': 1.6292, 'scale': 3.5008
Right		norm	'loc': -3.8505, 'scale': 8.7645
y 坐标误差数据的最佳拟合模型及参数	Row	hypsecant	'loc': -0.2944, 'scale': 3.1859
	Column	norm	'loc': -0.4794, 'scale': 6.6722
	Left	norm	'loc': -3.4195, 'scale': 5.9012
	Right	norm	'loc': 1.8586, 'scale': 8.4571



(a) x坐标误差数据的拟合直方图



(b) y坐标误差数据的拟合直方图

图 7 误差数据的拟合直方图

Fig. 7 Fitting histogram of error data

2) 实验二:优化生成拓扑方案

根据图 2 所示的大型仓储空间以及设置的定位单元规格(2 m×2 m),限制可使用的单元个数(每个定位单元由 4 个 UWB 基站构成)在 3~9 个之间,规定定位单元的布置坐标点只能在计算出的可布设点集合中随机选取。设置好基站部署的限制条件后,即可利用遗传算法对 UWB 的基站布设进行优化,计算出使用不同单元个数方案的最佳布设位置以及相应的目标分数。

实验结果:不同单元个数方案的最佳布设位置(坐标单位为 m)如下所示。

三单元:(22.5, 22), (49, 9.5), (14.5, 1)。

四单元:(43, 1), (25.5, 20), (1, 20.5), (11, 16.5)。

五单元:(39, 8.5), (33, 20.5), (10.5, 16), (4, 1), (10.5, 1)。

六单元:(35.5, 1), (39.5, 1), (2.5, 8), (11, 5.5), (22.5, 22), (39.5, 22)。

七单元:(25, 15.5), (2.5, 12.5), (37.5, 1), (25, 11), (48, 18), (4, 5), (46, 5.5)。

八单元:(33, 10.5), (29, 1), (39.5, 4), (18, 17), (11, 16.5), (49, 9), (21.5, 1), (46, 20.5)。

九单元:(11.5, 5.5), (11, 19.5), (46, 21.5), (5, 22), (1, 9), (49, 22), (49, 11.5), (25, 20.5), (25, 2.5)。

使用不同单元个数方案的最佳 UWB 基站布局对应的指标参数和目标分数如表 3 所示。

表 3 不同布局参数下的综合性能对比

Table 3 Comprehensive performance comparison under different layout parameters

单元数	测距	测距	干扰	干扰	CRB	PDOP	目标分数
	误差/ cm	方差/ cm ²	误差/ cm	方差/ cm ²			
7	0.78	44.39	0.38	27.79	4.57	5.29	33.63
8	0.65	44.02	0.37	32.93	3.83	5.66	34.91
5	0.56	49.78	1.32	31.54	6.02	4.47	35.51
9	0.66	47.47	1.34	19.85	3.35	6.00	35.86
6	0.08	47.98	1.69	38.99	4.67	4.90	36.50
4	0.54	53.37	1.35	40.55	7.64	4.00	38.18
3	0.79	64.41	1.40	45.90	9.77	3.46	42.66

从表 3 中可见,七单元方案的目标分数最低,即综合性能最高,相比使用定位单元数量最多的九单元方案,测距误差上升了 18.2%,测距方差下降了 6.5%,干扰误差下降了 71.6%,干扰方差上升了 40%,CRB 上升了 36.4%,PDOP 下降了 11.8%,综合性能提高了 6.2%。七单元方案相比效果最差的三单元方案,多使用了 4 个定位单元,测距误差基本相同,测距方差减少了 31%,干扰误差减少了 72.9%,干扰方差减少了 39.4%,CRB 减少了 53.2%,PDOP 上升了 52.9%,综合性能提高了 21.2%。由算法优化结果可知,针对图 2 的仓库场景下,UWB 定位单元的最佳布设位置为:(25, 15.5), (2.5, 12.5), (37.5, 1), (25, 11), (48, 18), (4, 5), (46, 5.5), 一共使用了 7 个定位单元,即布设了 28 个 UWB 基站,如图 8 所示。

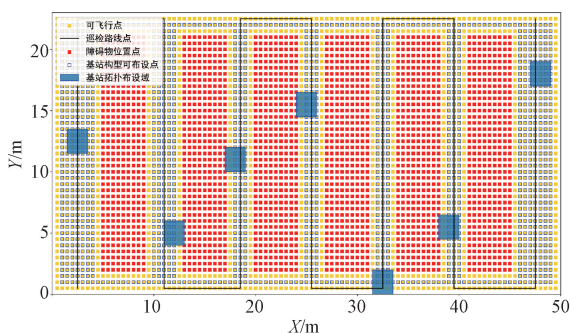


图 8 最优部署方案

Fig. 8 Optimal deployment

3) 实验三:性能实验

为了验证使用遗传算法优化设计基站拓扑的有效性,需要将人工设计的基站拓扑和使用遗传算法优化的基站拓扑进行比较分析。

(1) 人工设计实验。根据图 2 仓库的空间分布,定位基站拓扑采用锯齿形布局如图 3(b) 所示,该拓扑使用了 7 个定位单元,对应单元的布设坐标点为:(2.5, 11.5), (11, 1), (18.5, 11.5), (25.5, 22), (32.5, 11.5), (39.5, 1), (47.5, 11.5)。将这些坐标点数据作为人工

设计实验的输入参数。

(2) 算法优化实验。通过遗传算法对 UWB 定位单元的布设位置进行优化,寻找仓库场景下最优的基站位置和数量,即实验二的 UWB 基站布局 and 数量优化实验。

(3) 性能对比。通过目标函数输出的指标参数:定位误差、CRB、PDOP、定位单元个数(都为 7 个),以及目标分数来比较人工拓扑和算法优化拓扑的性能,如表 4 所示。

表 4 性能对比

Table 4 Comparison of performance

对象	测距	测距	干扰	干扰	CRB	PDOP	目标分数
	误差/ cm	方差/ cm ²	误差/ cm	方差/ cm ²			
算法	0.78	44.39	0.38	27.79	4.57	5.29	33.63
人工	0.82	50.93	1.95	28.89	4.15	5.29	37.95

从表 4 可以看出,使用遗传算法优化的基站拓扑的平均误差和方差都要小于人工设计的基站拓扑,定位精度提高了 58.1%,测距方差减少了 12.8%,干扰方差减少了 3.8%,虽然 CRB 值稍大于人工拓扑,但目标分数低于人工设计拓扑,综合性能提高了 11.4%。对比表 4 和 3 可看出,使用定位单元数量为 5,6,8,9 的算法优化方案同样比人工设计的拓扑方案具有更好的性能。

表 3 中定位单元数量为 5,6 的优化方案相比人工设计方案,在综合性能上分别优于人工设计拓扑 6.4%、3.8%,且因采用的定位单元数量更少,在成本上节约了 28.6%、14.3%,同时更具性价比。

表 3 中定位单元数量为 8,9 的优化方案相比人工设计方案,虽然需要使用更多的基站数量,但在测距误差、测距方差、干扰误差和 CRB 值指标上具有更低的数值,使得它们在综合性能上分别优于人工设计拓扑 8%、5.5%。

表 3 中定位单元数量为 4 的优化方案相比人工设计方案,在综合性能上低于人工设计拓扑 0.6%。对比测距误差和干扰误差指标可知,该优化方案具有更高的定位精度,但测距方差和干扰方差均高于人工设计拓扑,这意味着该优化方案的稳定性稍差。但是该优化方案仅采用了 4 个定位单元,即 16 个定位基站,相比人工设计拓扑(7 个定位单元,即 28 个定位基站),在成本上节约了 42.9%,因此对于某些场合,该优化方案仍是较优选择。

综上所述,经遗传算法优化设计的 UWB 基站拓扑可以有效地提高定位精度和稳定性,具有一定的性价比和较好的综合性能。

(4) 效率对比。采用通用设计法优化生成拓扑的时间和人工设计拓扑耗费的时间如表 5 所示。由于在实际的人工设计过程中需要反复调整以满足拓扑对定位精度、稳定性和性价比等性能要求,人工设计拓扑所需的总耗时包含了规划、布局、调整和验证等阶段的时间。

表 5 时间对比
Table 5 Comparison of time

设计方法	耗费时间/min
算法优化	34.01
人工设计	482.25

从表 3 可以看出,采用通用设计方法来生成最佳基站拓扑的时间远小于人工设计锯齿形布局拓扑所花费的时间,在效率上,通用设计法比人工设计法提高了 92.9%。这表明,采用通用设计法能显著提高在大型封闭空间中进行拓扑设计的效率。

4) 实验四:泛化性实验

为验证设计方法的泛化性,选择一个具有不规则外形轮廓的大型封闭仓储作为本文的扩展用例,其内部结构图如图 9(a)所示。针对该仓储采用通用设计法进行拓扑设计,实验生成的基站拓扑方案如图 9(b)所示,图中长方形即各定位单元的布设区域。

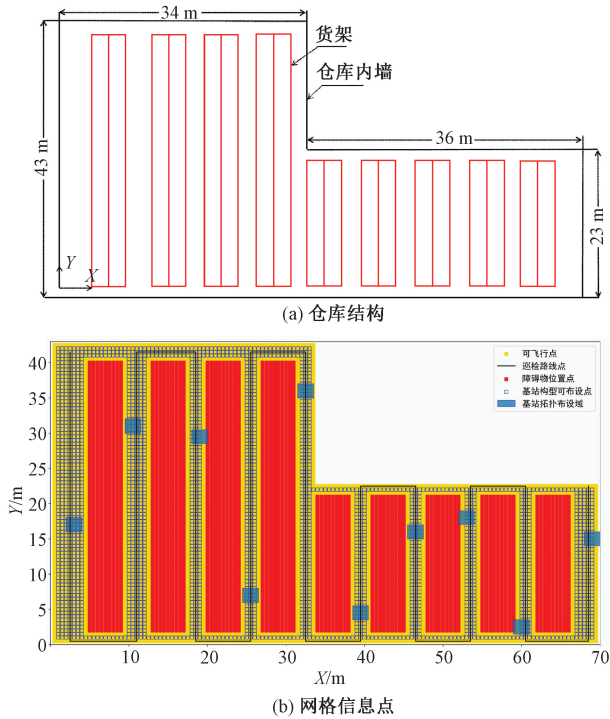


图 9 扩展用例
Fig. 9 The extended case

观察图 9(b)中生成的基站拓扑方案可知,各定位单元的布设位置合理,均能使巡检路线上的位置点处于较高精度的定位区域中,使用的定位单元数量为 10 个,使用该优化方案能兼顾较高的性价比和较好的综合性能。

5 结论

由于在大型含障碍物空间中人工设计基站拓扑来实

现无人装备的定位巡检存在设计效率低下、拓扑性能难以评估、性价比难以预测的问题,所以人工设计的基站部署方案往往难以达到实际应用的要求。为此本文提出了一种在大型封闭空间中定位基站拓扑的自动化通用设计方法。

本文的主要贡献有:1)通过仿真成功模拟了无人装备在巡检大型封闭空间过程中通过 UWB 定位单元获取定位数据;2)研发了一套用于在大型封闭空间中布置定位基站拓扑的自动化设计方法;3)提出了一套针对大型封闭空间的定位基站拓扑的科学评价体系。

实验结果表明:1)本文提出的通用设计方法不仅能够自动设计出性能较优、性价比较高的定位基站拓扑,而且比传统人工设计方法更为高效。2)提出的评价体系在科学性和普适性上表现较为出色,能够全面评估定位基站拓扑的性能。这些研究成果对于在大型封闭空间中设计 UWB 定位基站拓扑、实现无人机全自主定位和巡检具有重要的实际应用意义。

下一步将展开在大型封闭空间中无人装备的定位巡检路线优化的方法研究。

参考文献

[1] 杨狄,唐小妹,李柏渝,等. 基于超宽带的室内定位技术研究综述[J]. 全球定位系统,2015,40(5):34-40.
 YANG D, TANG X M, LI B Y, et al. A review of ultra-wideband based indoor localization technology[J]. GNSS World of China, 2015, 40(5):34-40.

[2] 顾慧东. 基于 UWB 的室内测距与定位系统[D]. 南京:南京邮电大学,2020.
 GU H D. Indoor ranging and positioning system based on UWB [D]. Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.

[3] LEE S, KIM J, MOON N. Random forest and WiFi fingerprint-based indoor location recognition system using smart watch [J]. Human-centric Computing and Information Sciences, 2019, 9(1):1-14.

[4] 曾显彬. 基于超声波与红外线的室内实时定位系统的研究与实现[D]. 泉州:华侨大学,2018.
 ZENG X B. Research and implementation of ultrasonic and infrared based real-time indoor positioning system [D]. Quanzhu: Huaqiao University, 2018.

[5] 焦尚彬,宋丹,张青,等. 基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5):436-442.
 JIAO SH B, SONG D, ZHANG Q, et al. Coal mine monitoring system based on ZigBee wireless sensor networks [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(5):436-442.

[6] 王益健. 蓝牙室内定位关键技术的研究与实现[D]. 南京:东南大学,2015.

- WANG Y J. Research and implementation on key technologies of bluetooth indoor positioning [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [7] BHARADWAJ R, YANG K, ALOMAINY A, et al. Effect of base station configurations and complexity on the accuracy of ultra-wideband localisation [C]. 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), IEEE, 2013: 19-20.
- [8] BHARADWAJ R, PARINI C, ALOMAINY A. Ultrawideband-based 3-D localization using compact base-station configurations [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 221-224.
- [9] 王雪延. 基于 UWB 基站配置的室内定位研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- WANG X Y. A study of indoor positioning based on uwb base-station configurations [D]. Xi' an: Xidian University, 2014.
- [10] 王川阳, 王坚. 超宽带应急定位基站布设研究 [J]. 测绘科学, 2019, 44(8): 174-181.
- WANG CH Y, WANG J. Study of base station layout of ultra-wideband emergency positioning [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(8): 174-181.
- [11] ZHANG R, SHEN F, LIANG Y, et al. Using UWB aided GNSS/INS integrated navigation to bridge GNSS outages based on optimal anchor distribution strategy [C]. 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), IEEE, 2020: 1405-1411.
- [12] 钟佳威. 面向 UWB 室内定位的基站布设方法研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- ZHONG J W. Research on base station deployment method for UWB indoor location [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018.
- [13] 陈兆. 基于多参数融合的超宽带室内定位基站布设优化 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- CHEN ZH. Optimization of ultra-wideband indoor positioning base Station configuration based on multi-parameter fusion [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2021.
- [14] 胡鹏军. 基于 UWB 的自适应室内定位系统设计与实现 [D]. 福建: 福建工程学院, 2022.
- HU P J. Design and implementation of adaptive indoor positioning system based on UWB [D]. Fujian: Fujian University of Technology, 2022.
- [15] 周海俊. 轨道车辆总装车间 UWB 基站布局设计与定位算法研究 [D]. 大连交通大学, 2023.
- ZHOU H J. Research on UWB base station layout design and positioning algorithm in rail vehicle assembly workshop [D]. Dalian Jiaotong University, 2023.
- [16] SALMAN N, MAHESHWARI H K, KEMP A H, et al. Effects of anchor placement on mean-CRB for localization [C]. The 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, Med-Hoc-Net 2011. Favignana Island: IEEE, 2011.
- [17] 田亚飞. 基于 UWB 的室内无线定位技术研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2019.
- TIAN Y F. Research on indoor wireless positioning technology based on UWB [D]. Jilin: Jilin University, 2019.
- [18] 潘林, 蔡昌盛, 罗小敏, 等. 一种顾及权重的 PDOP 值计算方法 [J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(3): 236-239.
- PAN L, CAI CH SH, LUO X M, et al. A computing method of weighted PDOP [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014, 31(3): 236-239.
- [19] 徐建华, 张雨霖, 韩勇强. 基于移动节点辅助定位的 UWB 室内定位方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(2): 141-147.
- XU J H, ZHANG Y L, HAN Y Q. UWB indoor location method based on moving node auxiliary positioning [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(2): 141-147.
- [20] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: Past, present, and future [J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80: 8091-8126.

作者简介



钟映春, 1995 年于江西理工大学获得学士学位, 1997 年于江西理工大学获得硕士学位, 2003 年于广东工业大学获得博士学位。现为广东工业大学自动化学院副教授, 主要研究方向为图像理解、高精度定位方法。

E-mail: gzzhw@126.com

Zhong Yingchun received his B. Sc. degree from Jiangxi University of Science and Technology in 1995, M. Sc. degree from Jiangxi University of Science and Technology in 1997, and Ph. D. degree from Guangdong University of Technology in 2003, respectively. Now he is an associate professor in the School of Automation, Guangdong University of Technology. His main research interests include Image understanding and high precision positioning method.



田志豪, 2017 年于广东工业大学获得学士学位, 现为广东工业大学自动化学院硕士研究生, 主要研究方向为无人机巡检定位。

E-mail: 476315807@qq.com

Tian Zhihao received his B. Sc. degree from Guangdong University of Technology in 2017. Now he is a M. Sc. student in the School of Automation, Guangdong University of Technology. His main research interests include UAV inspection and positioning.