

自适应三边定位算法在航站楼内的应用

丁亚男¹, 张旭^{2*}, 徐振国², 汤健²

上海工程技术大学航空运输学院, 上海 201620

摘要 为解决航站楼内非视距误差降低三边定位算法精度的问题, 提出自适应三边定位算法。该算法通过引入平均差作为基站选择的标准, 选择距离平均差最小的三个基站, 提升了基站到标签距离信息的可靠性。并以欧氏距离判断三边定位算法中两圆的位置关系, 结合位置判断系数和平均差来修正误差可能性大的圆半径。设计迭代更新圆半径的流程, 以两圆相交点距离 10 cm 为迭代停止阈值, 将三圆交点的外接圆的圆心作为标签的位置。添加高斯噪声来近似非视距误差, 通过仿真实验验证算法的有效性, 在 10% 高斯噪声下, 标签定位误差为 10.5 cm。并搭建实际旅客定位系统, 实验验证本文算法的标签定位精度小于 10 cm, 较加权质心法, 本文算法的定位误差在 X、Y、Z 方向上降低了 13%。

关键词 遥感; 自适应三边定位算法; 非视距误差; 航站楼; 室内定位; 超宽带

中图分类号 TP301.6

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0228002

Application of Adaptive Three-Sided Positioning Algorithm in Terminal Building

Ding Yanan¹, Zhang Xu^{2*}, Xu Zhenguo², Tang Jian²

Air Transport College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract The non-line-of-sight error in the terminal can lower the accuracy of the trilateral positioning algorithm. To address this issue, an adaptive trilateral positioning algorithm is used. By introducing the mean difference as the standard of base station selection, the algorithm selects the three base stations with the smallest mean distance difference and improves the reliability of the base station to label distance information. In the three-sided positioning algorithm, the Euclidean distance is used to decide the position relationship between the two circles, and the radius of the circle with a high error possibility is corrected by combining the distance information. Then, the circle's radius is iteratively updated. The distance between the intersection points of two circles is set to 10 cm as the iteration threshold, and the center of the circumscribed circle at the intersection point of three circles is used as the label's position. Simulation experiments are used to validate the algorithm's effectiveness after adding Gaussian noise to approximate the non-line-of-sight error. Under 10% Gaussian noise, the tag positioning error is 10.5 cm. Finally, an actual passenger positioning system experiment is constructed to verify that the tag positioning accuracy of the proposed algorithm is less than 10 cm, and position error of the proposed algorithm is 13% lower than that of the weighted centroid method in X, Y, and Z directions.

Key words remote sensing; adaptive three-sided positioning algorithm; non-line-of-sight error; terminal; indoor positioning; ultra-wideband

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-12

通信作者: *zx_sues@163.com

1 引言

航站楼内主要通过设置引导牌、人工服务点或招募志愿者的方式来引导旅客,这不仅会浪费大量的人力,还会出现沟通不清楚的问题^[1];通过室内定位可便捷引导旅客。超宽带(UWB)技术凭借它带宽大、信号容量大、传输速率高的优势,在众多无线定位技术中脱颖而出^[2-3]。但航站楼内环境复杂,信号因障碍物阻挡只能通过反射、折射的方式传播,由此导致接收信号含有大量的失真信号,带来了距离误差。

三边定位算法是常见的测距定位算法,通过三圆相交的方式可以得到移动标签的具体位置,但非视距误差使标签定位位置发生偏差。对此,高莉等^[4-5]利用最小二乘法估计标签位置,针对三圆相交区域的场合,利用优化算法求解目标位置,该算法的均方误差为传统三边定位方法的 60%。该方法只能应用于三圆相交区域的场合,无法求解非视距误差下出现的三圆不相交的情况,且采用优化算法求解可能会陷入局部最优解。杨思国等^[6-7]在其基础上提出了适用于三圆不相交的方法,采用同比例增加圆半径的方法求解三圆相交点的质心作为估计位置,该算法的定位误差为三边测量法的 11.2%。但采用同比例增加圆半径的方式同样增大了原有的非视距误差,算法的效果不稳定。李海啸等^[8-9]提出了基于加权的质心定位算法,在质心法的基础上,引入 UWB 信号强度作为求解质心的权重,通过 UWB 信号强度作为距离信息可靠性的依据,降低了非视距误差带来的位置估计损失。在 1% 的白噪声下,其定位精度较质心法提高近 20%,但该方法对于在基站附近的标签,定位效果不好。航站楼内环境复杂,非视距误差下旅客定位精度不高。

针对上述问题,本文首先采用基站选择策略来提升基站到标签距离信息的可靠性,选择基站到标签距离平方差最小的三个基站作为定位基站。接着采用迭代更新圆半径的方式来修正三圆相交,结合两圆的位置系数和平均差选择,先修正其中一个圆,并以两圆相交半径 10 cm 为迭代停止条件,按一定比例扩大另一个圆半径。以三圆交点的外接圆的圆心作为标签的位置。再设计仿真环境及实际环境下的位置估计实验,验证算法的有效性。

2 航站楼内测距方案设计

2.1 硬件组成

航站楼内旅客定位系统基站和标签的硬件由 STM32 主控芯片、OLED 显示屏、供电模块、决定执行基站或标签功能的 SWITCH 拨码开关、UWB 发射模块 DWM1000 和调试模块 SWD (Serial Wire Debug) 组成。通过 SPI、I2C、UART 协议进行设备之间的数据交互。航站楼内定位系统的硬件结构整体图如图 1 所示。

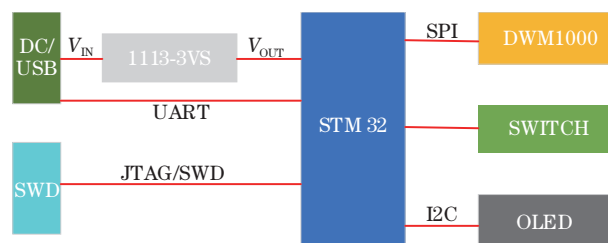


图1 系统硬件整体架构图

Fig. 1 System hardware overall architecture diagram

2.2 测距流程及实现

以 DecaWave 公司的 DW1000 芯片^[10]作为航站楼内旅客定位系统的核心,基于 TOF (Time of flight) 的方式进行测距。整个定位系统的算法过程可以简单描述如下。

1) 定位标签发出 UWB 信号请求测距,各基站根据距离远近依次接收信号。

2) 各基站经过一段时间的处理后,回发标签确定消息。

3) 标签接收到确定消息后,根据自身从发送信号到接收信号的总时间、各基站的处理时间,算出 UWB 信号的飞行时间,乘以电磁波的速度则可得标签到各基站的距离。

4) 根据标签到各基站的距离,结合各基站的位置坐标,列出三边定位算法的方程组,求解得出移动标签的位置信息。

采用 4 个基站和 1 个标签构成航站楼内旅客定位系统,通过双边测距 SDS-TWR^[11]协议进行测距。标签发送 1 个 poll 消息给 4 个基站,4 个基站收到 poll 消息后,回复 1 个 response 消息返回给标签,标签收到 response 消息后,再发送 1 个 final 消息作为测距周期进行测距。这样的优势是可以减少标签发送消息的次数,降低标签的功耗。标签和基站之间的交互、测距的原理图分别如图 2 所示。

通过图 2 的原理图,可以求得标签到 4 个基站

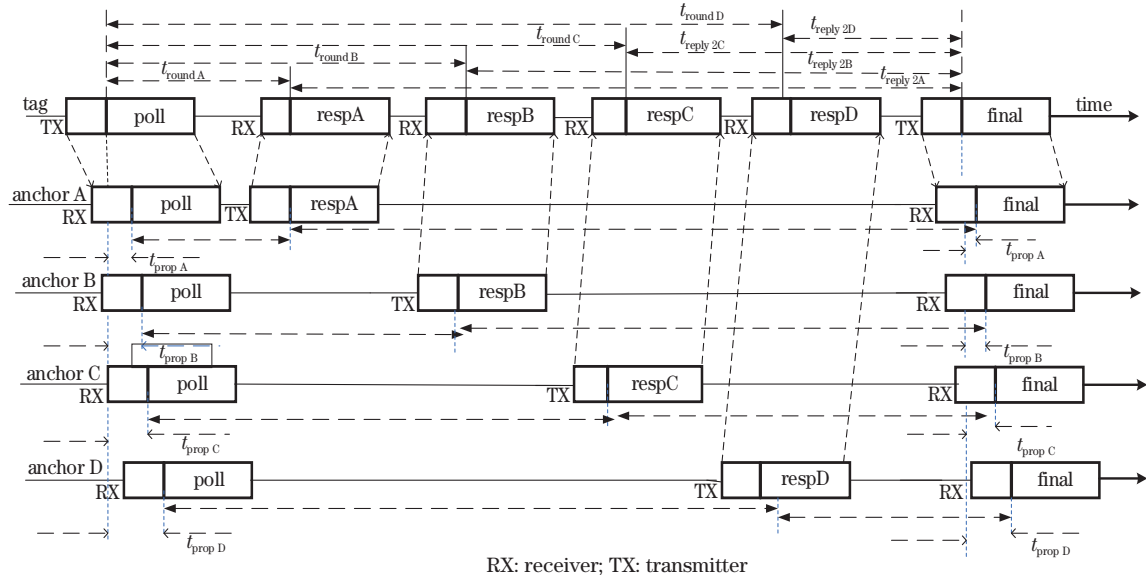


图 2 测距的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of ranging

的时间,求得的时间可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} t_{prop A} &= \frac{t_{round 1A} \times t_{round 2A} - t_{reply 1A} \times t_{reply 2A}}{t_{round 1A} + t_{round 2A} + t_{reply 1A} + t_{reply 2A}} \\ t_{prop B} &= \frac{t_{round 1B} \times t_{round 2B} - t_{reply 1B} \times t_{reply 2B}}{t_{round 1B} + t_{round 2B} + t_{reply 1B} + t_{reply 2B}} \\ t_{prop C} &= \frac{t_{round 1C} \times t_{round 2C} - t_{reply 1C} \times t_{reply 2C}}{t_{round 1C} + t_{round 2C} + t_{reply 1C} + t_{reply 2C}} \\ t_{prop D} &= \frac{t_{round 1D} \times t_{round 2D} - t_{reply 1D} \times t_{reply 2D}}{t_{round 1D} + t_{round 2D} + t_{reply 1D} + t_{reply 2D}} \end{aligned} \right. , \quad (1)$$

式中: $t_{prop j}$ 为标签到基站的时间; $t_{round 1j}$ 为返回时间; $t_{reply 1j}$ 为回复时间; $j=A, B, C, D$, 其中 A, B, C, D 代表 4 个基站。

3 自适应的三边定位算法

传统的三边定位算法,因基站和标签之间的测距误差导致以基站为圆心的三个圆无法相交于同一点^[12],出现三圆不相交或相交区域过大的情况,如图 3 所示。

针对图 3 所示的这两种情况,本研究改进了传统的三边定位算法,具体的步骤如下。

1) 基站的选择策略

由于航站楼内环境比较复杂,UWB 信号受到非视距误差的影响,有的基站测距的误差较大。对此,本研究设计了一种自适应的基站选择方案。可根据旅客的所在位置选择测量距离误差最小的 3 个基站,利用三边定位算法实现了三边定位。该方法的具体流程如下。

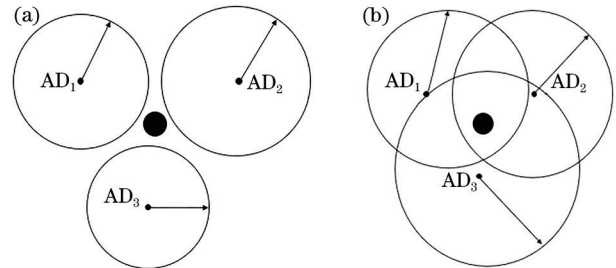


图 3 测距误差下的三边定位。(a)不相交;(b)相交且相交区域过大

Fig. 3 Three-side positioning under ranging errors. (a) No-intersection; (b) intersection, and the intersection area is too large

(1) 采集 n 个基站与标签的距离数据,采集 k 次,构成 $n \times k$ 的矩阵 T ,筛选掉超过通信范围的距离数据并填充 0。

(2) 对上述每一行数据计算其平均差,去除含 0 的数据,平均差的公式为

$$\sigma = \frac{\sum |x - \bar{x}|}{n}, \quad (2)$$

式中 x 为各基站与标签的距离; \bar{x} 为基站与标签的平均距离。

(3) 选择平均差最小的 3 个基站 r_1, r_2, r_3 作为三边定位的主要基站。

2) 基站测量距离的处理

对上一步获得 $3 \times k$ 矩阵 M 每一行计算离均值最近的距离,如图 4 所示,图中 r_m 为某一行的均值, r_1 为离均值最近的距离值, m 为矩阵 M 所在行。选

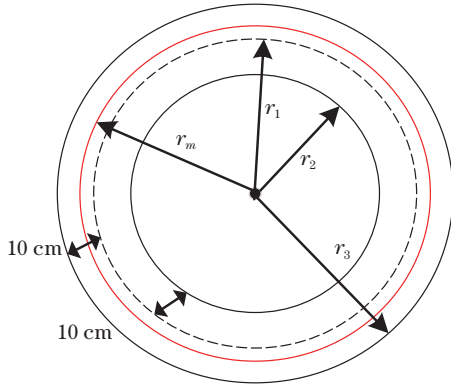


图 4 基站距离分布图

Fig. 4 Distance distribution of base station

择 r_m 为这一行的基站和标签的测量值,保留离均值 $r_m \leq 10$ cm 内的所有距离。

3) 自适应三边算法的实现

以平均差作为衡量距离测量有效性的标准,针对图 3 中所示的情况,对测量距离进行调整。

(1) 先计算出基站与基站之间的距离,利用欧氏距离计算基站 AD_1 和 AD_2 的距离 d_{12} ,同理计算出 d_{13}, d_{23} 。

(2) 判断以基站为圆心的两个圆之间的关系:如果 $(r_{a1} + r_{a2}) \geq d_{12}$,那么代表以基站 1 和基站 2 为圆心的圆之间的位置关系为相交或者相切。反之,

如果 $(r_{a1} + r_{a2}) < d_{12}$,那么代表以基站 1 和基站 2 为圆心的圆之间的位置关系为相离。

(3) 判断以基站为圆心的圆之间的关系:若两个圆相交,则求出两个圆之间的交点,并计算第 3 个圆的圆心到两者之间的距离,保留最近的距离 r 。若第 3 个圆的半径 $r_{a3} > r$,则表明 3 个圆之间存在共同相交的区域。

(4) 考虑到现实环境中可能出现的两种误差较大的情况,如图 3(a)和图 3(b)所示。本研究引入位置判断系数来判断两圆位置,以图 3(b)为例,若圆 AD_1 和圆 AD_2 中 $(r_{a1} + r_{a2}) / d_{12} > 1.2$,则代表这 2 个基站之间的测量距离远大于实际测量的距离,需要对其进行修正。同理,比较圆 AD_1 和圆 AD_3 中 $(r_{a1} + r_{a3}) / d_{12}$ 以及圆 AD_2 和圆 AD_3 中 $(r_{a2} + r_{a3}) / d_{12}$ 。选择比值最大的 2 个圆进行修正,再根据上文求出的平均差,选择 2 个圆中平均差大的距离先进行修正。通过先缩小圆的半径的方式,再计算 2 个圆的交点距离,判断其是否小于 10 cm,若小于 10 cm,则算法直接停止迭代,否则继续进行计算。自适应三边定位算法的修正流程图如图 5 所示。

4) 求解标签的位置

通过上述方法,可以求得 3 个圆的相交区域,且

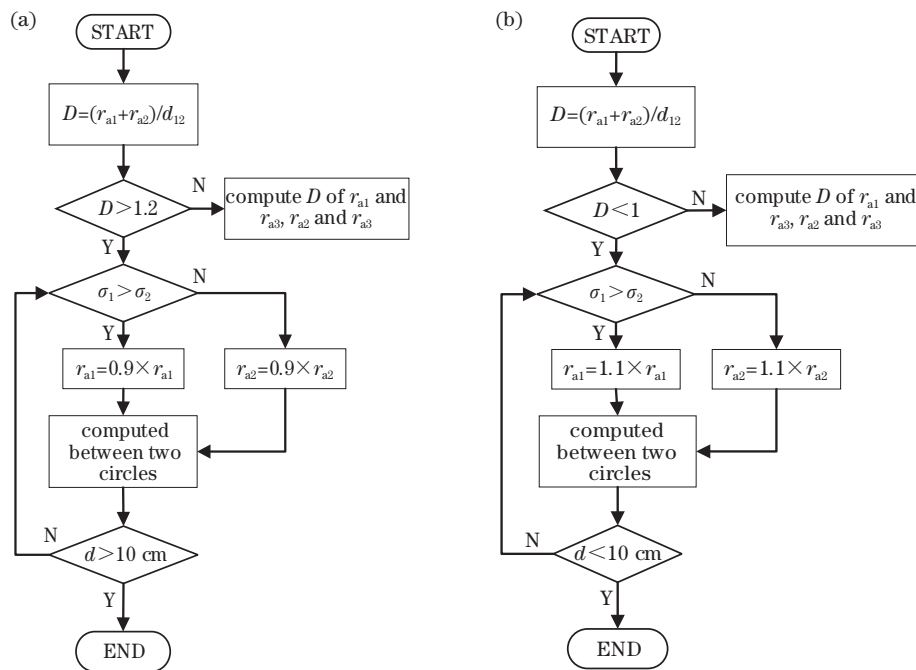


图 5 自适应三边定位的修正流程。(a)三圆相交区域过大时;(b)三圆不相交时

Fig. 5 Adaptive three-sided positioning correction process. (a) When the intersection area of three circles is too large; (b) when the three circles do not intersect

相交区域不会太大。为得到标签的具体位置,本研究采用三圆交点的外接圆圆心作为目标的定位位置。如图 6 所示。 A_1, A_2, A_3 为 3 个圆相交的交点, O 点是

A_1, A_2, A_3 三点外接圆的圆心, 即标签的位置。

设 A_1, A_2, A_3 的坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$, 则其外接圆的圆心坐标为 (a, b) , 其中

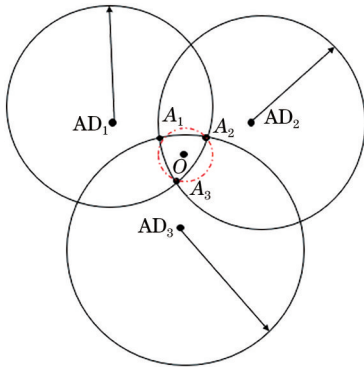


图 6 标签位置的求解

Fig. 6 Solution of label position

$$\begin{cases} a = \frac{(y_2 - y_1) \times (y_3^2 - y_1^2 + x_3^2 - x_1^2) - (y_3 - y_1) \times (y_2^2 - y_1^2 + x_2^2 - x_1^2)}{2 \times [(x_3 - x_1) \times (y_2 - y_1) - (x_2 - x_1) \times (y_3 - y_1)]} \\ b = \frac{(x_2 - x_1) \times (x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2) - (x_3 - x_1) \times (x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)}{2 \times [(y_3 - y_1) \times (x_2 - x_1) - (y_2 - y_1) \times (x_3 - x_1)]} \end{cases} \quad (3)$$

综上所述, 本文设计的自适应三边定位算法可以解决三边定位算法中由基站和标签的测距误差导致的 3 个圆不相交或相交区域太大的问题, 并且

以 3 个圆的交点的外接圆圆心作为目标的定位位置, 具有很好的适应性。

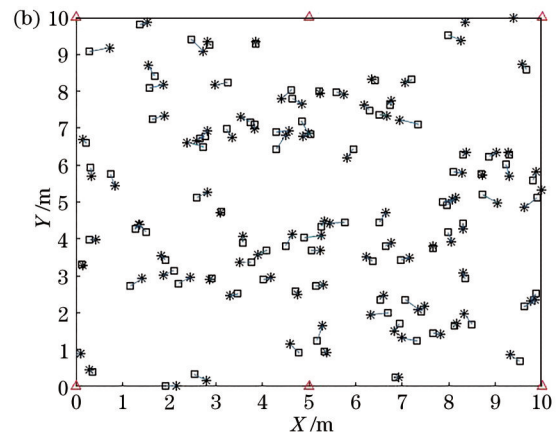
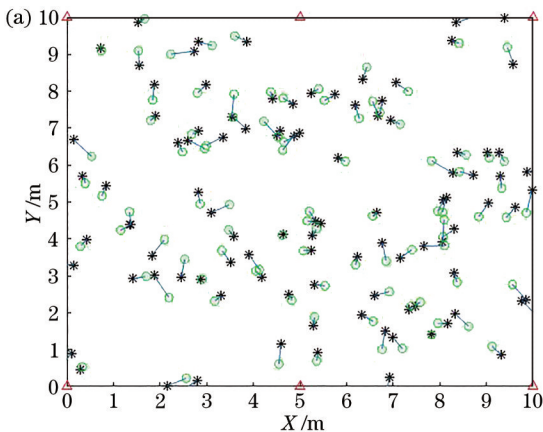


图 7 仿真位置估计图。(a) 加权质心法求解标签位置图; (b) 自适应三边定位算法求解标签位置

Fig. 7 Simulation position estimation diagrams. (a) Weighted centroid method to solve the label position map; (b) adaptive three-sided positioning algorithm to solve the tag position

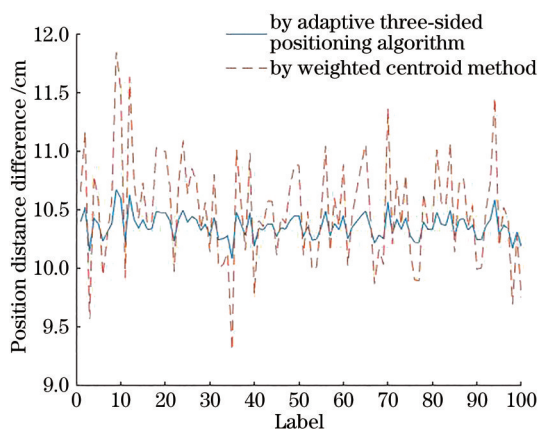


图 8 不同标签的估计位置与真实位置的距离

Fig. 8 Distance between the estimated location and the actual location for different labels

4 实验验证

4.1 仿真实验

为验证算法的有效性,采用加权质心法和本文提出的自适应三边定位方法求解标签的位置。实验平台: Intel(R) i7-8550U 处理器, 4G 内存, 软件及版本为 Matlab 2018a。实验在 10 m×10 m 的区域, 对距离信息加上 10% 的高斯噪声。以三角形标注基站的位置, 星号为实际的位置。圆圈和正方形为采用加权质心法^[13]和本文提出的自适应三边定位方法估计的标签位置。采用 6 个基站以及 100 个标签位置, 对估计出来的位置取均值显示, 结果如图 7 所示。

从图 7 可以看到, 加权质心法估算出的标签位置与实际位置相差较大, 而自适应三边定位算法估计出的标签位置与实际位置较为接近。为直观地看到两种算法估计出来的位置与真实距离的差距, 以两者之间的距离为参数, 画出标签实际位置和估计位置距离图, 如图 8 所示, 从中可以看到加权质心法估计的标签实际位置与真实位置的距离波动较大, 而自适应三边定位算法估计的标签位置与真实位置的距离波动较小, 定位精度在 10.5 cm 左右。

4.2 实际定位实验

采用的实验环境为上海工程技术大学航空运输学院 6339 室, 该环境下搭建三维实验平台。定位基站的理想间隔距离为 5~30 m, 由于实验环境场地的限制, 将定位基站 A0、A1、A2、A3 按边长为 5 m 的正方形布置, 高度均为 2 m。待定位标签的活动范围在定位基站的辐射范围内, 且高度不超过 2 m。实验环境与基站布置如图 9 所示。

为验证本文提出的自适应三边定位算法在非

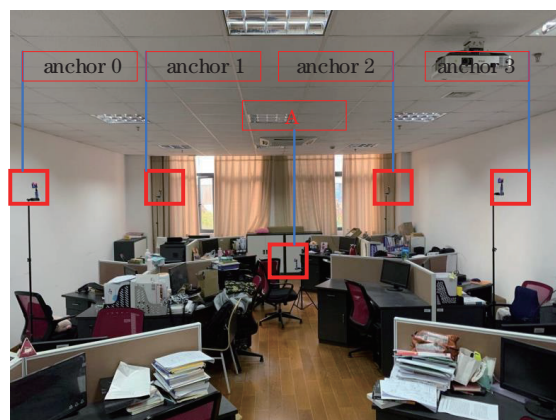


图 9 基站布局图

Fig. 9 Layout of the base station

视距环境下的性能, 在图 9 所示的环境中, 找到一个特殊的点 P , 其坐标为 (1, 2.5, 0.5)。分别采用最小二乘法^[14]、质心法、加权质心法、自适应三边定位算法在非视距传播环境下求解定位散点图和坐标变化图。从图 10 的散点图可以看出, 自适应三边定位算法求解的位置更加集中于 P 点的真实位置, 而其他的算法求解的位置则相对发散, 由此验证了自适应三边定位算法的有效性。

分别对最小二乘法、质心法、加权质心法、自适应三边定位算法在非视距传播环境下估计 P 点位置在 X, Y, Z 方向上进行均方误差求解, 结果如表 1 所示。自适应三边定位算法估计的 P 点位置在 X, Y, Z 上的定位误差小于传统的定位算法, 较加权质心法在 X, Y, Z 方向上平均下降了 13%。

表 1 各算法在各坐标轴下的定位精度评价

Table 1 Positioning accuracy evaluation of each algorithm under various coordinate axes unit: cm			
Localization algorithm	X	Y	Z
Least square method	12.32	8.35	7.36
Centroid method	15.43	9.37	8.21
Weighted centroid method	10.13	9.05	7.12
Adaptive three-sided localization algorithm	9.32	7.35	6.21

5 结 论

通过自适应三边定位算法实现了航站楼旅客定位系统中旅客位置的估计, 解决了因航站楼内非视距误差带来的旅客定位误差大的问题。通过基站选择策略提升了基站到标签距离的真实性, 结合三圆的位置关系来修正误差可能性大的圆半径, 提升了旅客定位的稳定性。最后在真实环境下, 通过实验

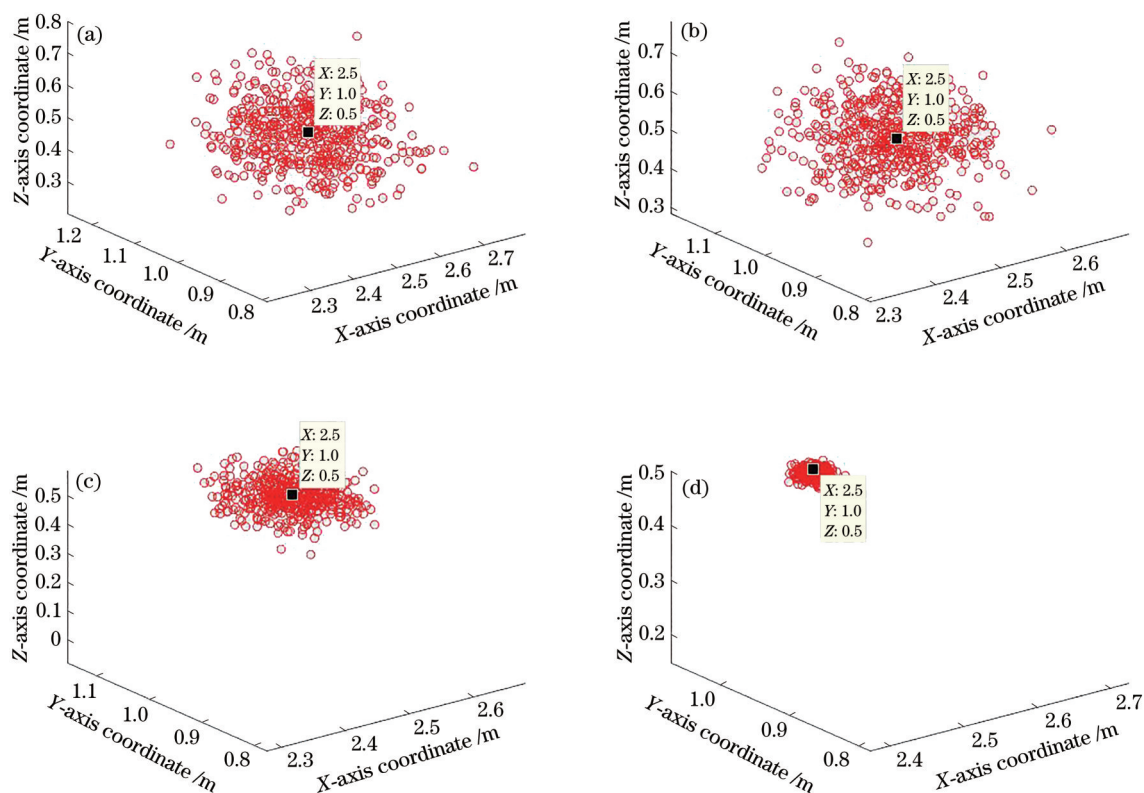


图 10 各算法的定位效果图。(a)最小二乘法;(b)质心法;(c)加权质心法;(d)自适应三边定位算法

Fig. 10 Positioning renderings of each algorithm. (a) Least square method; (b) centroid method; (c) weighted centroid method; (d) adaptive three-sided localization algorithm

对比了本文算法和其他定位估计算法的性能,本文算法定位误差较加权质心定位算法降低了 13%。

参 考 文 献

- [1] Ni Y. The public open space of terminal and its furnishings design from the perspective of urban design theory[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019.
倪源. 城市设计理论视域下航站楼公共休憩空间及其陈设设计[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [2] Wang Y, Zhao H D. VLC/PDR particle filter fusion indoor positioning based on smartphone[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0706001.
王杨, 赵红东. 基于智能手机的 VLC/IPDR 粒子滤波融合室内定位[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0706001.
- [3] Chen D Q, Wu X P, Hua Y T. Indoor visible light fingerprint localization scheme with range-assistance [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 060603.
陈道钱, 吴晓平, 华宇婷. 一种测距辅助的室内可见光指纹定位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 060603.
- [4] Gao L, Yang X M. An improved trilateration positioning algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(2): 78-81.
高莉, 杨雪苗. 一种改进的三边定位算法[J]. 工矿自动化, 2020, 46(2): 78-81.
- [5] Yang C C, Chen J H, Liu D L, et al. Indoor joint localization algorithm based on time and angle of arrival[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 222802.
杨超超, 陈建辉, 刘德亮, 等. 基于到达时间和到达角度的室内联合定位算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 222802.
- [6] Yang S G, Tao W Q. On double center algorithm based on trilateration[J]. Journal of Chuzhou University, 2019, 21(2): 32-35.
杨思国, 陶维青. 基于三边测量的双重质心算法研究[J]. 滁州学院学报, 2019, 21(2): 32-35.
- [7] He Y P, Liu R, Fu W P, et al. Indoor dynamic object positioning in NLOS environment based on UWB[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(8): 46-49, 54.
何永平, 刘冉, 付文鹏, 等. 非视距环境下基于 UWB 的室内动态目标定位[J]. 传感器与微系统,

- 2020, 39(8): 46-49, 54.
- [8] Li H X, Yu D, Hu Y, et al. Improved trilateration centroid localization algorithm for wireless sensor network[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(6): 1216-1223.
李海啸, 于东, 胡毅, 等. 改进的无线传感器网络三边质心定位算法[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(6): 1216-1223.
- [9] Pan Z X, Jiang J. Study of trilateral optimization algorithm based on UWB[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(2): 25-29.
潘忠祥, 江剑. 基于 UWB 的三边优化算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(2): 25-29.
- [10] Luo B. Research and implementation of TDOA location algorithm based on UWB technology[D]. Haikou: Hainan University, 2017.
罗勃. 基于 UWB 技术的 TDOA 定位算法的研究与实现[D]. 海口: 海南大学, 2017.
- [11] Yan J Q. Algorithm and error analysis of indoor positioning system based on UWB[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
严嘉祺. 基于 UWB 的室内定位系统的算法与误差分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [12] Zhao H M, Zhao J L. An overview of ultra-wideband indoor positioning algorithms[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(9): 130-142.
赵红梅, 赵杰磊. 超宽带室内定位算法综述[J]. 电信科学, 2018, 34(9): 130-142.
- [13] Liu Y, Xiao B X, Yin B Q. Quadrilateral weighted centroid localization algorithm based on RSSI of correction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10): 107-114.
刘雨, 肖本贤, 尹柏强. 基于修正 RSSI 值的四边形加权质心定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 107-114.
- [14] Zhao S H. Research and implementation of indoor location based on low power Bluetooth[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
赵帅豪. 基于低功耗蓝牙的室内定位研究与实现[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.