

一种新型 VLC 高精度混合定位算法的实现

吴志豪¹, 施安存¹, 孙悦¹, 段靖远¹, 盖轶冰²

(1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083; 2. 北京市微技术研究所, 北京 100006)

摘要: 为了实现移动机器人的高精度定位, 研究了一种新型的可见光混合定位算法, 并对该算法进行了理论分析和实验验证。首先, 针对传统信号接收强度(RSS)定位算法与到达角度(AOA)定位算法的优缺点, 改进了 RSS 算法, 使其不再利用接收到的信号强度和距离的关系而改用接收到的信号强度和探测器旋转角度的关系, 并综合以上两种算法分析得到一种混合定位算法模型。同时对混合型算法进行理论分析, 主要从角度的测量方面, 确定要达到的目标参数, 进而可以达到理想的定位精度。然后通过实验验证该算法模型的实现可行性, 主要从测量出的角度数据进行计算, 并分析通过该实验数据计算出的定位精度是否达到定位精度目标。实验结果表明: 定位精度为 6.11 cm, 高于 10 cm 定位目标。同时分别相对于其他两种定位算法, 该算法定位精度高、成本低、可行性高。

关键词: 可见光通信技术; 移动机器人; 混合定位算法; 高精度

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1126001

Realization of a new VLC hybrid location algorithm with high accuracy

Wu Zhihao¹, Shi Ancun¹, Sun Yue¹, Duan Jingyuan¹, Gai Yibing²

(1. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. Beijing Institute of Micro Technology, Beijing 100006, China)

Abstract: In order to realize the high precision positioning of the mobile robot, a new hybrid positioning algorithm based on VLC was established, the theoretical analysis and experimental verification were investigated. First, according to the advantages and disadvantages of the traditional RSS position algorithm and AOA position algorithm, the RSS algorithm was improved in the paper. Using the relationship between the signal strength and the angle rather than the distance, a hybrid positioning algorithm model was obtained. Then the positioning algorithm was analyzed theoretically in the actual implementation process mainly from the angle of measurement in order to achieve the target parameters. The feasibility of the algorithm was verified by the experiment and the measurement data was obtained. Finally, the experimental data was analyzed to observe the positioning accuracy. The experimental results show that the localization accuracy of the proposed experiment is 6.11 cm, which is less than 10 cm. Besides, compared with the other two kinds of positioning algorithm, the algorithm had high precision, low cost and high feasibility.

Key word: VLC; mobile robot; hybrid location algorithm; high precision

收稿日期: 2017-03-05; 修订日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(61375083)

作者简介: 吴志豪(1991-), 男, 硕士生, 主要从事可见光通信方面的研究。Email: wzh201014032@163.com

导师简介: 段靖远(1979-), 副研究员, 博士, 主要从事可见光通信方面的研究。Email: jyduan@semi.ac.cn

0 引言

随着物联网技术的发展以及移动互联网时代的到来,基于室内定位技术的位置服务系统,越来越广泛地应用于大型商场导购、移动机器人定位等领域。商场货品的位置信息需要精确到 10~20 cm 左右,才能保证顾客可以确切的找到需要的商品。同时,在移动机器人搬运货物场景,需要机器人精准将货物放入特定位置,精度同样需要达到 10~20 cm 左右。同时,定位技术的低成本、安全性高等要求也变得越来越受重视。传统的无线定位技术,例如基于射频(RF)的定位系统,不仅成本高,而且安全性能比较差,在一些电磁敏感的环境中,使用会受到限制^[1]。用传统的 GPS(Global Positioning System)定位技术对室内物体或人员进行定位,由于信号穿透能力差,定位精度比较低,在几十米甚至几百米范围^[2]。

近些年,随着 LED 照明技术的不断发展,基于可见光通信(Visible Light Communication, VLC)定位技术的室内定位研究逐渐步入到前沿,受到广泛关注。利用 LED 进行室内定位,在实现照明和通信的双重功能基础上,兼具功耗低、定位精度高、无电磁干扰、使用环境安全等优势。目前,关于 VLC 定位技术的研究,常用的算法主要包括到达时间差算法(Time Difference of Arrival, TDOA), 到达时间算法(Time of Arrival, TOA), 基于信号接收强度算法(Received Signal Strength, RSS)^[3] 以及到达角度算法(Angle of Arrival, AOA)^[4]。TDOA 定位精度比较低,存在相位模糊,设备成本较高等缺点^[5]。AOA 算法定位精度高,但对无线传感网络节点的硬件和成本要求比较高,成本昂贵^[6]。RSS 算法实现起来相对简单,但定位精度低^[7]。TOA 虽然是目前常见的射频测距技术,但是在室内应用中,严重的多径和非视距现象造成测距误差较大^[8]。由于每种算法都具有其各自的优缺点,所以文中将设计一种新型算法,利用改进型的 RSS 算法以及 AOA 算法,组成一种混合型算法,成本低、实现简单、定位精度较高,可以达到 10~20 cm 左右。

目前,国内外关于 VLC 室内定位技术的仿真与实验,证明了实现精度要求在理论上的可行性。2011 年,英国的一家研究机构提出了一种基于 AOA 算法的

模型,仿真过后表明其理论定位精度在 6 cm 左右^[9]。2013 年,该机构又提出了一种基于 RSS 算法的可见光室内定位系统模型,并对其进行了仿真^[10]。综上所述,上述两种算法的仿真,均在理论上证明了所研究的算法可以达到需要的精度。

文中提出基于 VLC 新型混合算法的定位模型,并对该模型进行了实验验证,证明了该算法在现实中的可行性。

1 算法模型及定位方案

1.1 改进型 RSS 算法模型

传统的 RSS 算法,接收信号强度与传播距离和路径损耗存在密切的联系,即“距离-损耗”模型^[11]。如公式(1):

$$p = p_0 + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + \zeta \quad (1)$$

式中: p 是参考距离; p_0 代表距离为 d_0 时接收到的信号强度; d 为发射端到接收端的真实距离; ζ 为一个均值为 0,方差为 ΔdB 的一个正态随机变量,代表着在传播过程中的损耗; n 代表路径损耗系数。由于其路径损耗是一个与距离无关的随机变量,同时,其路径损耗系数与真实有可能相差几倍,导致需要计算的 d 值误差增加。所以文中在此基础上,将信号强度与距离的关系改进成为信号强度与接收端接收角度的关系。文中将其称为改进型 RSS 算法模型,其原理如图 1 所示。

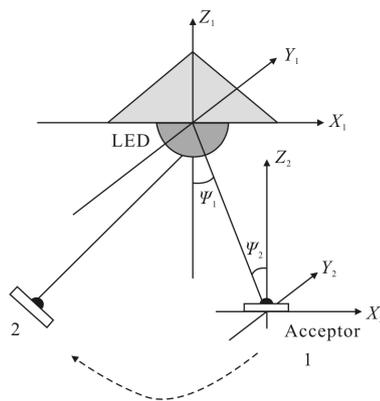


图 1 RSS 算法模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of RSS algorithm model

图 1,假设接收机在最初的位置,其探测器与发射机呈现角度为 Ψ_2 。在保证接收机与发射机距离不变的情况下,从状态 1,通过不水平旋转,直到状态 2。

根据此过程,文中得出:

$$p(x)=pe^{-ax}(1-R) \quad (2)$$

式中: $p(x)$ 代表探测器吸收的光功率值; p 代表光功率在 x 方向均匀入射; a 代表探测器的吸收系数; R 代表反射系数; x 代表探测器法线与和发射机连线角度的绝对值,有:

$$|x|=\sqrt{\sigma^2+\eta^2} \quad (3)$$

式中: σ 代表探测器垂直方向与信号灯的角度; η 代表水平方向与信号灯的角度。由公式(2)、(3)及其旋转过程分析,由于探测器水平旋转,当 η 为 0 时, $|x|$ 最小,其吸收到的光功率最大,此时认为其达到了二维水平方向的对准。此改进型 RSS 模型,排除了上述损耗干扰对传统 RSS 模型的影响,主要是由于其不再根据接收功率来精确计算探测器与发射机的实际距离,从而大大降低了定位误差,有效地提高了定位精度。

1.2 AOA 算法模型介绍

AOA 算法如图 2 所示。在一个二维平面对 E 点进行定位,主要利用已知两个基站(BS1、BS2)的位置,从而推算出 E 点坐标的位置。通过图 2 可以得出以下关系式:

$$X=x_1+r_1\cos\alpha_1 \quad (4)$$

$$Y=y_1+r_1\sin\alpha_1 \quad (5)$$

可以看出,需要定位的节点通过多个接受器阵列感知信标节点发送信号的方向,计算未知节点和信标节点之间的方位角等,再通过角度计算未知节点的位置。该定位算法精度虽然高,但是需要多接收器阵列,成本昂贵。

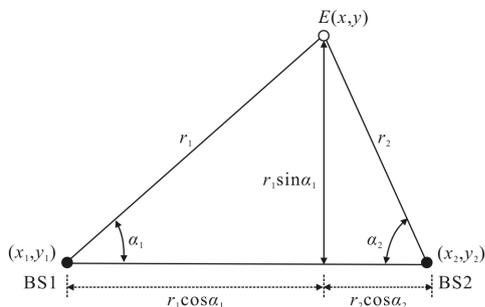


图 2 AOA 算法模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of AOA algorithm model

1.3 定位方案

针对于上述两种传统型算法的优缺点,综合改

进型 RSS 算法以及 AOA 算法模型,文中提出了一种混合算法的定位方案,其定位思路如下:

(1) 利用电机控制单个探测器 360°水平旋转,实时检测光功率吸收值,当检测到光功率吸收值达到最大时,文中认为探测器在水平方向对准了信号灯,即 $\eta=0$ 。在多灯环境下,文中确定其至少可以获取到两栈信号灯信息;

(2) 通过 VLC 通信技术,从发射机发射的信号中,获取房间高度 h 以及发射机绝对坐标等信息,进行保存;

(3) 利用地磁角角度传感器,测量探测器水平转角,并进行记录;

(4) 根据图 2 以及公式(4)、(5),计算出 r_1 ,从而推算出 E 点坐标;

(5) 在多灯分布的环境中,对不同信号灯采集到的位置信息进行储存,计算,然后利用最小二乘法,来提高探测器的位置精度。

2 技术方案

由上述公式分析可知,定位精度主要由水平角度的测量精度决定。所以本节主要从该方向分析,来证明达到定位精度实现的可行性。

2.1 未知节点坐标分析

由上述公式进行化简可得:

$$x_1+r_1\cos\alpha_1=x_2+r_2\cos\alpha_2 \quad (6)$$

$$y_1+r_1\sin\alpha_1=y_2+r_2\sin\alpha_2 \quad (7)$$

化简公式(6)可得:

$$r_1=\frac{x_2-x_1+r_2\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1} \quad (8)$$

代入到公式(7)中可得:

$$r_1=\frac{\tan\alpha_2(x_2-x_1)+y_1-y_2}{(\tan\alpha_2-\tan\alpha_1)\cos\alpha_1} \quad (9)$$

$$r_2=\frac{\tan\alpha_1(x_2-x_1)+y_1-y_2}{(\tan\alpha_2-\tan\alpha_1)\cos\alpha_2} \quad (10)$$

将 r_1 、 r_2 带入可得 E 点坐标:

$$X=\frac{x_2\tan\alpha_2-x_1\tan\alpha_1+y_1-y_2}{\tan\alpha_2-\tan\alpha_1} \quad (11)$$

$$Y=\frac{\tan\alpha_2\tan\alpha_1(x_2-x_1)+y_1\tan\alpha_2-y_2\tan\alpha_1}{\tan\alpha_2-\tan\alpha_1} \quad (12)$$

由该公式可以看出, E 点坐标和方位角 α_1 、 α_2 相关。

2.2 方位角精度分析

图 3 是旋转角和地磁角联合示意图。其中 A 点

代表探测器所在位置。在俯仰角确定的情况下,其扫描过程在房顶映射为圆形。对地投影探测器 A 点为圆心,半径为 R 。仍然设定房间的高度为 3 m,长度为 5 m,宽度为 3 m。同时, F 映射的点为 G 点, D 点映射的点为 E 点, B 点映射的点为 C 点。此外假设 B 点为信号灯点, F 点为误差点。如图 4 所示,在单灯模型下,画出映射图,来分析具体的转角精度。

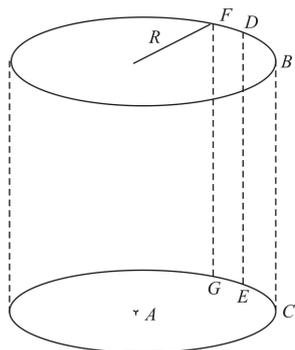


图 3 旋转角和地磁角联合示意图

Fig.3 Associated schematic diagram of the rotation angle and geomagnetic angle

图 4 假定 E 点是定位的准确位置, G 点为误差位置。不考虑地磁角的误差情况下其水平角误差为 $\Delta a = a_2 - a_1$; 同时从图中读取到地磁角误差为 a_3 。所以

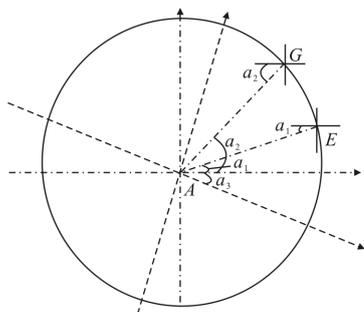


图 4 探测器扫描的映射图

Fig.4 Mapping graph of the detector scanning

水平角误差修正为 $\Delta A = \Delta a \pm a_3$ 。反过来以 E 点或 G 点作为坐标点来分析 A 点情况一致。暂且不考虑地磁角误差, A 点准确坐标为 $(R \sin a_1, R \cos a_1)$ 。以 G 点作为坐标点分析 A 点坐标为 $(R \sin a_2, R \cos a_2)$ 。那么应该满足以下关系式:

$$\Delta X = R \sin a_2 - R \sin a_1 \leq 0.1 \text{ m} \quad (13)$$

$$\Delta Y = R \cos a_1 - R \cos a_2 \leq 0.1 \text{ m} \quad (14)$$

联合公式(12)、(13)可得:

$$R^2(2 - \sin a_1 \sin a_2 - \cos a_1 \cos a_2) < 0.02 \text{ m} \quad (15)$$

合并可得:

$$R^2[2 - 2 \cos(a_2 - a_1)] < 0.02 \text{ m} \quad (16)$$

式中: $\Delta a = a_2 - a_1$ 。加上一个地磁角的修正可得,最终的转角精度为:

$$\Delta A = \Delta a \pm a_3 \quad (17)$$

于是得出 ΔA 与 R 之间的关系:

$$\cos \Delta A = 1 - \left(\frac{0.01}{R^2} \right) \quad (18)$$

根据上述假设,则 R 的范围应为 $(0, \sqrt{(5^2 + 3^2)})$ 。由此测量出 R 范围从 1~6 m, 间隔为 1 m 一组数据,并记录出角度精度与 R 之间的关系,如表 1 所示。利用 Matlab 并得出两者的线性关系图,如图 5 所示。

表 1 角度精度与 R 之间的关系

Tab.1 Relationship between the angle accuracy and R

R/m	$\Delta A/(^\circ)$
1	8.110
2	4.052
3	2.701
4	2.021
5	1.621
6	1.351

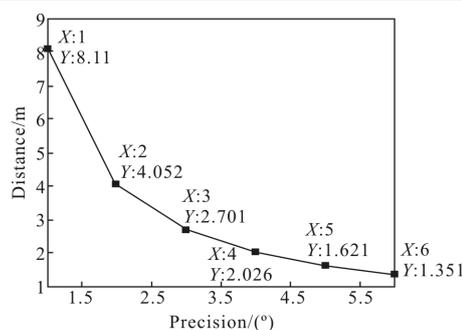


图 5 水平角度精度与 R 之间的关系示意图

Fig.5 Schematic diagram of the relationship between horizontal angle accuracy and R

通过上述分析,文中要通过实验验证在角度满足的情况下,其定位精度是否满足上述要求。

3 实验验证与结果

3.1 系统搭建

文中最开始需要搭建整体定位系统,如图 6 所示。考虑到操作的现实性,在搭建过程中将探测器固

定在步进电机之上，并在探测器前端固定一个视场角为 10' 的远焦镜头，使其减小外界光的干扰。



图 6 系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of the system

针对现实实验中的房间布局以及实际误差分析，文中重新定义角度误差，如表 2 所示。

表 2 角度误差校正

Tab.2 Angle error correction

Distance/m	Error/(°)	
	10 cm	20 cm
1	8.110	16.260
2	4.052	8.110
3	2.701	5.404
4	2.021	4.052
5	1.621	3.242
6	1.351	2.701

3.2 光学平台的搭建与测量

搭建光学平台，如图 7 所示。获取到角度的真实值，与传感器的角度进行对比，计算出角度精度。同时选择与光学镜头光路平行的位置，固定激光笔，用来确定镜头最终定位的具体位置。

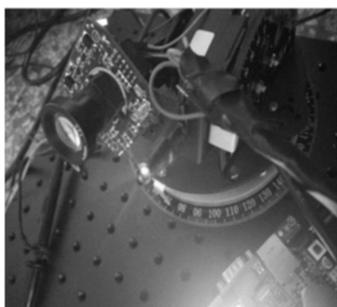


图 7 光学平台示例

Fig.7 Optical platform demonstration

3.3 数据测量

文中选择距离灯垂直距离 3 m 左右的位置，进行测量。得到数据，如表 3 所示。

表 3 水平角测量的误差分析

Tab.3 Error analysis of horizontal angle measurement

Protractor/(°)	Angle/(°)	Signal value/V	Error/(°)
0	1.1	0	0.1
20	18.5	0.052	1.5
28	27.2	0.64	0.8
29	28.6	1.1	0.4
30	29.7	1.66	0.3
31	31.7	2.64	-0.7
32	32.2	2.62	-0.2
37	36.9	2.3	0.1
40	40.2	1.4	-0.2
44	44.3	0.1	-0.3
48	47.6	0.35	-0.4
55	52.2	0.66	0.2
56	56.4	1.12	0.4
57	57.3	1.59	0.3
58	57.7	2.73	-0.3
59	59.1	2.70	0.1
60	60.2	2.45	0.2
62	62.5	2.28	0.5
65	65.3	1.48	0.3
70	70.8	0.24	0.8

分析表 3 可知，其水平角平均误差为 0.42° 误差小于表 2 对应距离计算的角度误差。

3.4 结果

结果表明，水平角度测量值得出的角度误差都在所需的范围内。同时文中利用激光笔，使其准确地对准光源，然后根据角度误差平均值计算出距离误差。设定距离误差为 Z，纵坐标误差为 Y，横坐标误差为 X，可知：

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (19)$$

由上表可以看出其峰值位置时，水平角度误差为 0.42°，设为 φ。

同时分析水平误差，有下面公式：

$$X \approx \frac{x_2[\tan(\alpha_2+\varphi)-\tan\alpha_2]-x_1[\tan(\alpha_1+\varphi)-\tan\alpha_1]}{\tan\alpha_2-\tan\alpha_1} \quad (20)$$

由表读取数据,代入到公式中,并取灯距离为 3 m,可得 $X=4.32$ cm。

$$Y \approx \frac{y_1[\tan(\alpha_2+\varphi)-\tan\alpha_2]-y_2[\tan(\alpha_1+\varphi)-\tan\alpha_1]}{\tan\alpha_2-\tan\alpha_1} \quad (21)$$

同理计算可得 $Y=X=4.32$ cm。由公式(19)可得,最终误差 $Z=6.11$ cm。

分析上述结果发现,其最终误差在 10 cm 之内,达到了实验预期的目的。

4 结 论

文中在综合不同算法优缺点的基础上,提出了一种基于 AOA 算法和改进型 RSS 的混合型算法,并提出了一种可行的技术方案来验证达到设定场景所需要的定位精度以及角度的精度值。最后通过实验验证,得到该混合算法可以实现期望的定位精度。

参考文献:

- [1] Gallagher T, Li B, Dempster A, et al. A sector-based campus wide indoor positioning system [C]//IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2010(1): 1-8.
- [2] Hui L, Darabi H, Banerjee Petal. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, 2007, 37 (6): 1067-1080.
- [3] Kim H, Kim D, Yang S, et al. An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique [J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2013, 31(1): 134-144.
- [4] Horiba M, Okamoto E, Shinchara T, et al. Improved NLOS detection scheme for hybrid TOA/AOA-based localization in indoor environments[C]//IEEE International Conference on Ultra Wide Band, 2013(2): 37-42.
- [5] Wang Peng, Lei Bin, Zhang Hongshun, et al. Design and implementation of TDOA positioning system [J]. *China Radio*, 2013(1): 63-64.(in Chinese)
- [6] Wang Ziyou, Zhou Xianying. Research on node localization algorithm based on angle of arrival of wireless sensor network[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2012(7): 40-42. (in Chinese)
- [7] Zhang Yuan, Liu Ying, Xu Feng, et al. Multi target localization algorithm based on [J]. *RSS Electronic Products World*, 2013(9): 34-37. (in Chinese)
- [8] Wang Qin, He Jie, Zhang Qianxiong, et al. The indoor TOA positioning algorithm for ranging error classification [J]. *Journal of Instruments and Meters*, 2011(32): 2851-2856. (in Chinese)
- [9] Kim H S, Kim D R, Yang S H, et al. Indoor positioning system based on carrier allocation visible light communication [C]//Quantum Electronics/Conference, 2011: 787-789.
- [10] Wu Nan, Wang Xudong. High precision indoor visible light localization method based on LED [J]. *Journal of Electronics and Information Science*, 2015, 37(3): 727-733. (in Chinese)
- [11] Patwari N, Wang Y W, O' Dea R J. Relative location in wireless networks [C]//Vehicular Technology Conference, 2001(2): 1149-1153.