

基于白光 LED 的室内行走目标三维定位方法

金 杉^{1,2}, 金志刚¹

(1.天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072; 2.天津市公安消防局,天津 300020)

摘 要: 为了解决现有可见光室内动态目标定位方法中出现的阴影遮蔽、保密性差、光源能耗量大且相互干扰等实际问题,提高定位精度,提出一种基于白光 LED 的室内行走目标定位方法。分析了室内行走特点,建立基于固定的复眼接收器、SiO₂ 透明地板和光束位移的定位模型,对两处最优复眼透镜进行虚拟直射变换,实现行走目标的三维定位。该方法仅用单一 LED 发射器即可精确定位,节省了大量能耗。同时,有效缩短了光束传播距离,提高了光功率,具有良好的保密性和泛化性。实验表明:动态目标定位方法监测位置误差率能够限制在 3.5% 以内;当对 5 个以上行走目标定位时,若相邻接收器间距与接收器覆盖半径相等,则定位精度最高。

关键词: 白光 LED; 室内三维定位; 行走目标; 光束位移; 虚拟直射; 变换

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017003

3D positioning method of indoor walking target based on white light LED

Jin Shan^{1,2}, Jin Zhigang¹

(1.School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2.Public Security Fire Department of Tianjin, Tianjin 300020, China)

Abstract: For resolving the problems including shadowing, poor secrecy, expensive consumption, and excessive interference in visible light indoor dynamic target positioning method with improving accuracy, an indoor walking target 3D positioning method was proposed based on white light LED. According to the walking characteristic, the model was established with fixed ommateum receivers, SiO₂ transparent floor, and beam displacement (BD). Then the virtual direct transform (VDT) was actualized with two optimum ommateum lenses for 3D position. Indeed, the proposed method used only one LED emitter for saving energy. Also, it obtained the shorter beam propagation distance, improved optical power, and better confidentiality and generalization. Experiment shows that with the proposed method the error rate can be limited within 3.5%. And more than 5 targets can be most effectively positioned, while the distance between adjacent receivers is equal to the coverage radius from each one.

Key words: white light LED; indoor 3D positioning; walking target; beam displacement; virtual direct; transform

收稿日期:2017-02-05; 修订日期:2017-03-03

基金项目:国家自然科学基金(61571318);海南省重点研发计划项目(ZDYF2016153);青海省科技计划项目(2015-ZJ-904)

作者简介:金杉(1982-),男,工程师,博士,主要从事光电子通信、测控定位方面的研究。Email:shanye2006@163.com

通讯作者:金志刚(1972-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事网络通信、物联网技术方面的研究。Email:shanye2006@163.com

0 引言

随着 LED 光源技术的发展和进步, 具有高亮度、低功耗、长寿命等优点的白光 LED 已有逐渐取代日光灯和白炽灯的趋势^[1]。由于白光 LED 通信调制便捷、响应迅速^[2], 在无害辐射、保密、稳定性等方面与红外、紫外、射频等方式相比优势明显, 成为一种新兴的可见光通信(VLC)方式, 正在逐步推广到室内定位领域^[3]。

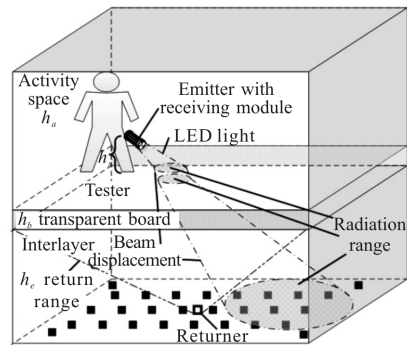
现有白光 LED 室内定位方式大多存在光通信与射频联用、多顶灯固定光源等特点^[4]。参考文献[5]建立多固定光源下的相似像素监测环境, 确定克拉美罗界, 通过设置图像传感接收器(ISR)和 LED 达到准确的 3D 定位目的。参考文献[6]采用所谓光通信与射频联用方法, 同样采用多顶灯固定光源作为发射器, 而接收器是一种移动双图像传感器, 最终由射频传输完成接收器的位置报告。类似的, 参考文献[7]建立了一个用于室内定位的立方体接收器, 采用光传输的收信角度法(AOAs)进行定位, 以射频报告位置。上述 LED 定位方法均比较成熟, 能够维持信道的稳定性, 可操作性强, 但是对于动态目标的跟踪定位采样需求缺乏针对性措施, 射频信号易被截取, 光路过长、易受到阴影遮挡、保密性不足, 需求的光源点多、能耗量大, 光源之间易产生同频互扰。由此, 分析动态目标行为特征, 减少光源数量, 缩短光路, 成为室内 LED 定位亟待研究解决的问题。

文中采用一种便携 LED 光源发送自身 ID 编码, 兼顾照路与通信的双重用途。以 SiO₂ 钢化玻璃作为室内的透明板地面, 将若干均布的有线接收器置于透明板下方的夹层内。接收器则使用参考文献[8]提出的复眼定位仪。根据行走特征进行 LED 稳定采样, 按照折射原理, 选取两处接收光信号镜面数量最多的接收器上的光功率最强透镜, 采取模拟探测位置方法, 建立光源位置方程得到离散定位坐标。通过串联离散定位坐标、比较连续两次采样强度差异, 取得精确地行走路径的动态定位。该方法的具体贡献是:(1) 全部采用 LED 通信方法定位;(2) 设计了针对移动目标行为的定位方法;(3) 实现了单 LED 光源的短传输距离定位, 节约了能耗, 增强了保密性。

1 建立模型

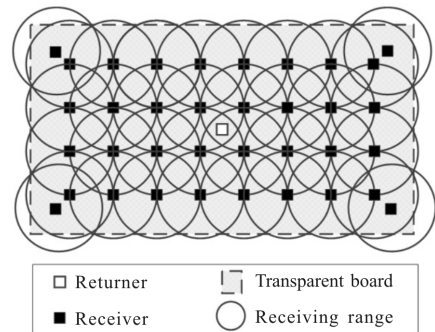
1.1 系统模型

如图 1(a)所示, 系统使用单一 LED 光源发射器 i , 坐标为 $T_i(x_{ii}, y_{ii}, z_{ii})$, 固结在定位用胶靴侧沿上, 其光源侧面装有 1 个向下的便携接收模块 λ ; 发射器 i 至透明板上表面距离 h_s 。房间高度为 h , 人员活动空间高度为 h_a , 透明板厚度为 h_b , 透明板下方夹层厚度为 h_c , 存在 h_c 。室内大气折射率为 n_1 , 透明板折射率为 n_2 , 存在 $n_1 < n_2$, 折射损耗忽略不计。房间内共有 M 个接收器和 1 个向上的视距链路范围可覆盖整个人员活动空间的回传发射器 τ , 均位于夹层空间底部。如图 1(b)所示, 全部接收器均匀分布在夹层底部 $h_c=0$ 处。任一接收器 j 坐标为 $R_j(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$, 在透明板底部(夹层顶部)接收范围半径为 r_R 的圆形。相邻两接收器间距 $l=r_R$ 。



(a) 系统环境

(a) System environment



(b) 接收器分布

(b) Receivers distribution

图 1 LED 光定位系统模型

Fig.1 LED position system model

1.2 通信模型

文中以 LED 作为系统信源,采用直射链路(LOS)。其中,接收光功率 P_r 与发射光功率 P_t 关系记作:

$$P_r = P_t \times H(0) \quad (1)$$

式中: $H(0)$ 为信道的直流增益。若引入 Lambertian 辐射模型, $H(0)$ 可由公式(2)给出。

$$H(0) = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad (2)$$

$$0 \leq \psi \leq \text{FOV}$$

式中: d 为收发信机间距;FOV为光接收器视角; m 为辐射瓣模式数,存在 $m = -\ln 2 / \ln(\cos \varphi_{1/2})$, $\varphi_{1/2}$ 为发射器半功率角; A_r 为接收面积; φ 为辐射角; ψ 为接收角; $T_s(\psi)$ 为接收设备滤波增益; $g(\psi)$ 为聚光增益。可见, P_r 与发射器辐射角、接收角、传播距离、光检测器件(PD)相关。以 RSS 信息定位需要由 P_r 获取预计距离实现,若收发信机入、发射角都是 0,则光功率常数 C_{opt} 成为确定 P_r 的参数,由此 P_r 记作:

$$P_r = C_{opt} / d_{LOS}^2 \quad (3)$$

PD 的输出电流与 P_r 成正比,变换为射频功率 P_{RF} 后,存在预计距离

$$d_{LOS} = (C_{RF} / P_{RF})^{1/4} \quad (4)$$

式中: C_{RF} 为射频功率常数,和光电转换效率、光功率常数相关。由此,公式(4)求出的预计距离与接收光功率无关。

1.3 定位数据基础

图 2 中系统 LED 接收器工作原理以复眼定位仪原理为基础进行改进。设每个接收器透镜数量为 N^k ,室内被 LED 光束照射的接收器数量为 N^j ,任一被 LED 光束照射的接收器 j 上监测到入射光束的透镜数量为 α_j ,选取同一时光照透镜数最多的两个接收器 R_1 和 R_2 作为定位坐标基础。若 $\max\{\alpha_j\} > 2$,则任选两个接收器。

$$[R_1, R_2] = \max[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_{N^j}]_R, j \leq N^j \quad (5)$$

再对两个接收器 R_1 和 R_2 上的全部镜面分别进行光接收功率 P_{ijk} 由高至低排序,选取各接收器接收功率最高一个透镜入射数据作为定位数据基础,以达到以两处接收器定位光源的目的。

$$P_{ijk}^{\max} = \max[P_{ij1}, P_{ij2}, \dots, P_{ij\beta}, \dots, P_{ijN^k}]_R, \beta \leq N^k, k=1, 2 \quad (6)$$

若其中任一接收器存在 $\max\{P_{ijk}\} > 1$,则在该接收器内分布计算,求取各相等 P_{ijk} 透镜监测数据

$C_{ijk} = \{\psi_{ijk}, \theta_{ijk}, x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk}\}$ 的算数平均值作为该接收器监测值 C_{Rj} 。其中, ψ_{ijk} 为透镜入射角, θ_{ijk} 为水平角, $(x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk})$ 为透镜坐标。

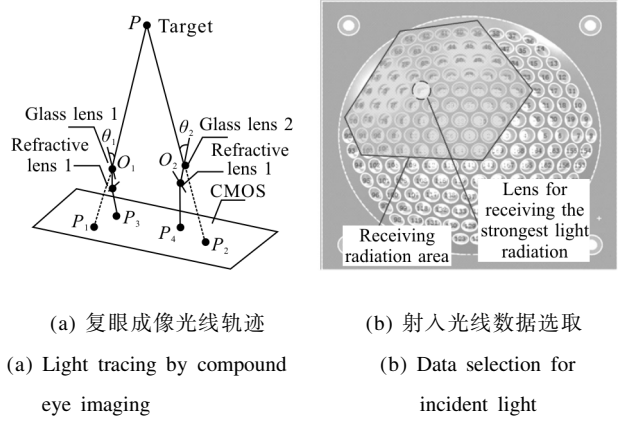


图 2 定位基础数据来源

Fig.2 Basic data source for positioning

2 方法

2.1 虚拟直射变换

文中以光束位移(Beam Displacement, BD)设计传输路径,所用透明板具有以下优势:

(1) 增加有效照射强度。上述已知 $n_1 < n_2$,透明板上下两侧均为室内大气,存在

$$\begin{cases} n_1/n_2 = \sin \theta_2 / \sin \theta_1 \\ \Delta d = h_b \sin(\theta_1 - \theta_2) / \cos \theta_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: Δd 为位移距离; θ_1, θ_2 分别为透明板入射角、折射角。

如图 3(a)所示,原用于照明的光束经过减小辐射范围,提高了单位面积辐射功率。

$$S_i' / S_i = \pi r_i'^2 / \pi r_i^2 = (r_i' / r_i)^2, r_i' < r_i \quad (8)$$

式中: S_i, r_i 分别为直射覆盖面积、半径; S_i', r_i' 分别为经过光束位移变化后的覆盖面积、半径。可知 $r_i' < r_i \Rightarrow S_i' < S_i$ 。又因为:

$$n_{ij} = P_r' / (q S_i') = P_r / (q S_i) \quad (9)$$

式中: n_{ij} 为转化效率; q 为辐射强度,二者均不变,存在 $S_i' < S_i \Rightarrow P_r' > P_r$ 。由此可见,二次折射方法既抵消了光信号的传播衰减,又降低了多 LED 光源之间因为光辐射面积过大导致光信号相互干扰的几率。

(2) 缩短光束可能受遮蔽的传播距离。对比多 LED 顶灯作为光源定位目标方法,使用透明板将原先近似 $h = h_a + h_b + h_e$ 光路垂直距离,降至近似 $h_s + h_b + h_e$,

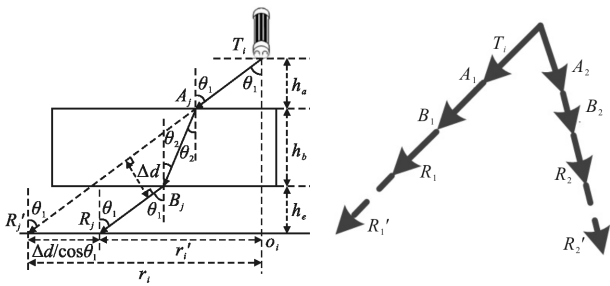
存在 $h_s \ll h_a$; 而且 $h_b + h_e$ 垂直区间范围内无阴影遮蔽, 维护了光传输稳定。

(3) 缩短了夹层需求高度。由公式(7)可知, 无论 h_e 取值大小, 均存在 $\Delta d / \cos \theta_1 = r_i - r_i'$ 。因此, 只要接收器分布满足图 1(b), 可以 $h_e \rightarrow 0$ 。

定义 1. 虚拟直射坐标。记为 $C_{R_j}^{\max'}$, 是根据二次折射原理, 模拟在直射环境下接收器 j 所在的坐标及入射光实测数据。

定义 2. 虚拟距离差。记为 $\Delta C_{R_j}^{\max}$, 是虚拟直射坐标 $C_{R_j}^{\max'}$ 与实际接收器坐标 $C_{R_j}^{\max}$ 之差。

如图 3(b)所示, 由虚拟直射坐标 $C_{R_j}^{\max'}$ 与实际接收器坐标 $C_{R_j}^{\max}$ 建立入射光线在水平面投影关系, 实现两处接收器对光源的定位。



(a) 单接收器水平视角 (b) 双接收器垂直视角
(a) Horizontal view angle for single receiver (b) Vertical view angle for double receivers

图 3 虚拟直射变换原理

Fig.3 Principle of virtual direct transform

2.2 具体方法

研究测试者携带 LED 定位发射器 i 行走行为, 是实现文中动态目标定位的关键环节。

2.2.1 静止站立

一名测试者携带发射器 i 位于固定某一点站立。发射器 i 光源不变。此时, 光源传输到夹层底部的覆盖范围内的全部 n 个接收器监测到数据为 C_{R_n} :

$$C_{R_n} = \begin{bmatrix} \psi_{R_1} & \psi_{R_2} & \cdots & \psi_{R_j} & \cdots & \psi_{R_n} \\ \theta_{R_1} & \theta_{R_2} & \cdots & \theta_{R_j} & \cdots & \theta_{R_n} \\ x_{R_1} & x_{R_2} & \cdots & x_{R_j} & \cdots & x_{R_n} \\ y_{R_1} & y_{R_2} & \cdots & y_{R_j} & \cdots & y_{R_n} \\ z_{R_1} & z_{R_2} & \cdots & z_{R_j} & \cdots & z_{R_n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $z_{R_j} = 0, j \in [1, n]$; ψ_{R_j} 为透镜入射角度; θ_{R_j} 为透镜

水平固定方向。

设接收光功率 P_{ijk}^{\max} 最强的两处复眼透镜分别为 $k=1$ 和 $k=2$ 。取 C_{R_n} 中入射功率最强的两处复眼透镜的监测数据集 C_R^{\max} :

$$C_R^{\max} = \{C_{RF_1}^{\max}, C_{RF_2}^{\max}\} = \begin{bmatrix} \psi_{R_1}^{\max} = \psi_{R_1} & \psi_{R_2}^{\max} = \psi_{R_2} \\ \theta_{R_1}^{\max} = \theta_{R_1} & \theta_{R_2}^{\max} = \theta_{R_2} \\ x_{R_1}^{\max} = x_{R_1} & x_{R_2}^{\max} = x_{R_2} \\ y_{R_1}^{\max} = y_{R_1} & y_{R_2}^{\max} = y_{R_2} \\ z_{R_1}^{\max} = z_{R_1} & z_{R_2}^{\max} = z_{R_2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

令 $C_{RF_j}^{\max} = \{\psi_{R_j}^{\max}, \theta_{R_j}^{\max}, x_{R_j}^{\max}, y_{R_j}^{\max}, z_{R_j}^{\max}\}, j \in \{1, 2\}$ 。 $\psi_{R_j}^{\max}, \theta_{R_j}^{\max}$ 分别为复眼透镜的入射角与水平角。经过虚拟距离差 $\Delta C_R^{\max} (\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j), \Delta z_j = 0$ 处理, 存在 $C_R^{\max'} = \{\psi_{R_j}^{\max'}, \theta_{R_j}^{\max'}, x_{R_j}^{\max'}, y_{R_j}^{\max'}, z_{R_j}^{\max'}\}$ 。

$$\begin{cases} x_{R_j}^{\max'} = x_{R_j}^{\max} + \Delta z_j \\ y_{R_j}^{\max'} = y_{R_j}^{\max} + \Delta y_j \\ z_{R_j}^{\max'} = z_{R_j}^{\max} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $(x_{R_j}^{\max'}, y_{R_j}^{\max'}, 0)$ 为虚拟直射坐标。由水平坐标 $(x_{R_j}^{\max'}, y_{R_j}^{\max'}, 0), (x_{R_j}^{\max}, y_{R_j}^{\max}, 0), j \in \{1, 2\}$ 采用插值法得到光束在夹层底部水平面上的两条投影直线 $f_{R_1}^{\max}(x_{ii})$ $f_{R_2}^{\max}(x_{ii})$ 。

$$f_{R_1}^{\max}(x_{ii}): (x_{R_1}^{\max} - x_{ii}) / (x_{R_1}^{\max} - x_{R_1}^{\max'}) = (y_{R_1}^{\max} - y_{ii}) / (y_{R_1}^{\max} - y_{R_1}^{\max'})$$

$$f_{R_2}^{\max}(x_{ii}): (x_{R_2}^{\max} - x_{ii}) / (x_{R_2}^{\max} - x_{R_2}^{\max'}) = (y_{R_2}^{\max} - y_{ii}) / (y_{R_2}^{\max} - y_{R_2}^{\max'}) \quad (13)$$

$f_{R_1}^{\max}(x_{ii})$ $f_{R_2}^{\max}(x_{ii})$ 交点坐标 $(x_{ii}, y_{ii}, 0)$ 即为发射器 i 的水平坐标。垂直坐标 z_{ii} 为:

$$z_{ii} = \sqrt{(x_{R_j}^{\max'} - x_{ii})^2 + (y_{R_j}^{\max'} - y_{ii})^2} \tan(\psi_{R_j}^{\max'}) \quad (14)$$

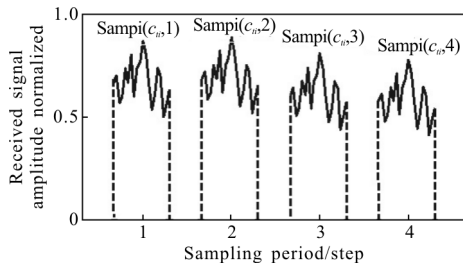
由此, 得到三维坐标 $c_{ii}(x_{ii}, y_{ii}, z_{ii})$, 即为发射器 i 与其携带者的站立实时坐标定位。当 $z_{ii} > (h_b + h_e + h_s)$ 时, 表明测试者站立的垂直位置高于透明板上表面。

2.2.2 沿水平方向行走

一名测试者携带发射器 i 在室内沿直线行走。人类行走通常呈左右足交替迈进, 双足轮流执行迈步和着地动作。其中, 迈步动作呈动态, 缺乏稳定性; 而着地动作呈静态, 易于记录位置数据, 因此文中在行进时的单足着地时段实施 LED 通信定位。已知发射器 i 固结于定位用的胶靴的左只外侧, 每当左脚着

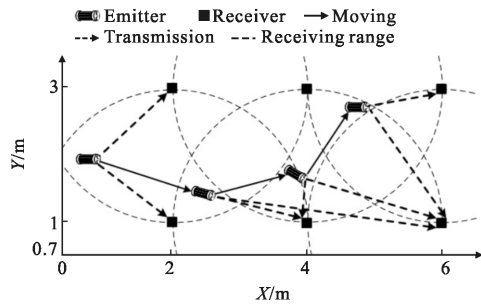
地开始至抬起前,发射器 i 根据瞬时确定的 ψ_{R_i} 、 θ_{R_i} 、 z_{ii} 等参数传输光信号编码。

设测试者步长为 l_{step} , 水平方向匀速行进步数为 $step_i$, ($step_i \in N^+$)。两次采样间隔时长为 t_a , 每次采样消耗时长为 t_b , 开始采样时点 t_d , 得到实时数据集 $samp_i(c_{ii}, t_d)$ 。其中, $c_{ii}(x_{ii}, y_{ii}, z_{ii})$ 通过公式(14)和(15)得到。如图 4 所示, 定位系统可以按照方式 1 实施脉冲式采样, 由此可以绘制出动态目标定位轨迹图。



(a) 定位系统接收信号波形

(a) Received signal waveform from positioning system



(b) 沿目标行走轨迹定位

(b) Walking trajectory positioning along targets

图 4 行走目标定位

Fig.4 Walking objective positioning

2.3 定位数据传输

如图 5 所示, 每步行走定位成功后, 两处测定的接收器 R_j 将分布式接收到的实测数据有线传输至服务器; 经过拟合确认, 将拟合值从服务器有线传输

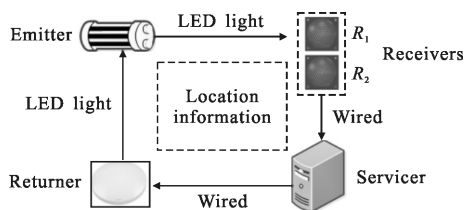


图 5 行走定位数据传输过程

Fig.5 Walking positioning data transmission

至回传发射器 τ ; 再由 τ 转换为 LED 可见光信号向便携接收模块 λ 回传定位信息。若为多件便携发射器同时用于定位, 回传发射器按照有线信号输入的时间顺序向不同 ID 的便携发射器编码发送定位信息。

3 实验测试

3.1 环境参数

为了检验文中动态目标定位方法精确性与可靠性, 建立了室内实验环境模型, 分别实施匀速和变速行走定位。通过在房间底部设置摄像机连续摄录, 取每次单足着地位置和时间作为真实值。设文中涉及的定位方法结果与摄录真实位置间存在欧氏距离 ξ 。实验中, 定位误差率为 ξ 与房间对角线距离之比。实验环境参数见表 1。

表 1 白光 LED 定位环境参数

Tab.1 Environment parameters for white LED position

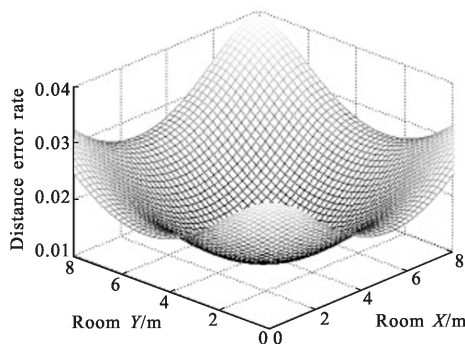
| Item | Value |
|---|------------------|
| Room size($L \times W \times h$)/ m^3 | 8×8×4 |
| Height: $h_a, h_b, h_c, h_d/m$ | 2.5, 0.5, 1, 0.3 |
| Refractivity: n_1, n_2 | 1.00, 1.60 |
| Emitter quantity | 1-10 |
| Receiver quantity: M | 20 |
| Receiving radius: r_R/m | 2 |
| Adjacent receivers' distance: l/m | 2 |

3.2 匀速行走定位

当一名测试者以 1.5 m/s 均匀步速在室内随机行走时, 实验结果如图 6(a) 所示, 误差率始终小于 4%, 对于要求监测精度高的室内动态定位系统而言非常可靠。在室内临边角区域的距离误差率最高达到 3.22%, 高于中心位置约 0.93%。可见, 边角区域部署接收器较少, 光束传播路径较远, 对定位存在不利影响。同理, 文中方法适用于大空间环境下的室内定位, 既有效减少了 LED 顶灯光源传输衰减的影响, 又能够精确地对行走目标进行动态定位。

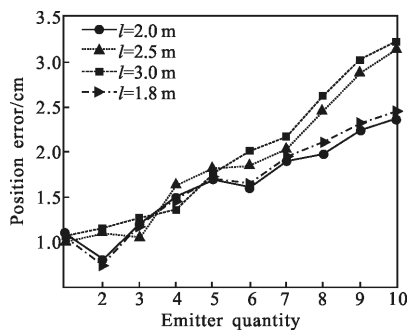
在接收器部署密度不同的条件下, 多人测试同一时间、不同数量的 LED 发射器在实验区域的行走定位情况。如图 6(b) 所示, 在光源数量较少时, 相邻接收器间距 $l=2\text{ m}$ 和 $l=1.8\text{ m}$ 的环境产生误差较小,

密集部署接收器能够有较多的接受光照透镜可供比较,测试精度较高;在光源数量较多时, $l=2\text{ m}$ 的环境下的定位测试误差更加明显的低于 $l=2.5\text{ m}$ 和 $l=3\text{ m}$ 。同时, $l=1.8\text{ m}$ 的环境受到接收器因距离过近而相互干扰因素影响,出现误差增大。可见,以 $l=2\text{ m}$ 即 $l=r_r$ 的约束条件部署接收器,能够有效地实现室内行走定位。



(a) $l=2\text{ m}$ 时随机行走定位误差

(a) Random walking positioning error at $l=2\text{ m}$



(b) 不同 l 定位误差比较

(b) Comparison of different l positioning errors

图 6 匀速定位实验误差

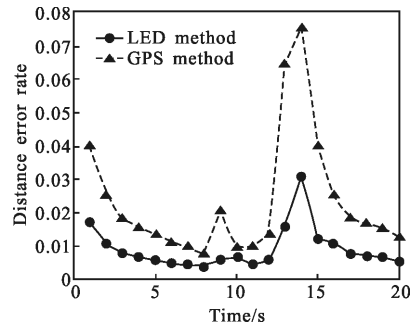
Fig.6 Experiment error of uniform motion positioning

3.3 变速行走定位

当一名测试者以变速在室内随机行走时,增加手持 GPS 设备进行对照,随时间变化的位置误差如图 7(a)所示,文中 LED 定位方法误差率依然小于 4%,GPS 设备定位误差则高达 8%。由于同样是按步速测量,LED 方法更接近于摄像得到的真实值。虽然其连续定位值间平滑度不及 GPS 方法,但是 LED 方法避免了因电子信号屏蔽导致的定位数据失真。

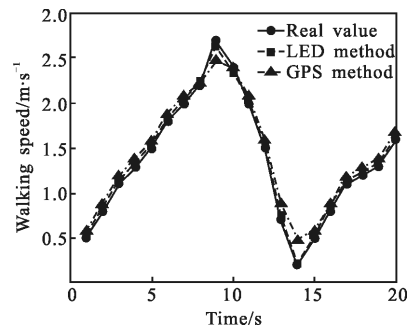
如图 7(b)所示,在变速行走过程中,按照文中 LED 方法定位得到的行进速度与真实值基本吻合,

而 GPS 方法的误差最多达到 0.3 m/s。这是由于 LED 与连续摄像两种方法均很好的应用了人类步行特点进行定位,便于将原先离散的时点步速数据取算数平均值转换为以“m/s”为单位。同时,可见光通信对行进速度测定及回传频次平均为每秒 0.82 次,高于 GPS 无线方法的每秒 0.37 次,因此 LED 定位数据在持续变速后计算得到的速度值也较 GPS 方法更加精准。



(a) 定位误差变化

(a) Transformation of positioning error



(b) 行走速度变化

(b) Transformation of walking speed

图 7 变速定位实验误差

Fig.7 Experiment error of variable motion positioning

4 结论

文中针对当前关注的室内动态目标定位问题进行研究,对室内环境、行走习惯、发射器与接收器设置等问题进行了具体讨论,采取光束位移原理进行光辐射传输,利用两处最有利复眼透镜的有向定位特点和接收器部署、虚拟直射变换方法,建立行走过程中的 LED 光源三维定位坐标系,实现了室内行走目标的精确定位。实验证明,文中方法缩短了信息传输距离,消除了阴影遮蔽影响,非常适用于监测精度和保密需求高的大空间环境下的室内定位。

参考文献:

- [1] Cui Fayi, Shao Guanlan. Weighted centroid localization algorithm based on multilateral localization error of received signal strength indicator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2162–2168. (in Chinese)
- [2] Ren Yongjie, Xue Bin, Yang Linghui, et al. Study on the problem of weighting for the workspace measuring and positioning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 668–672. (in Chinese)
- [3] Lim Jaechan. Ubiquitous 3D positioning systems by led-based visible light communications [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(2): 80–85.
- [4] Ahmed Arafa, Sumant Dalmiya, Richard Klukas, et al. Angle-of-arrival reception for optical wireless location technology [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7755–7766.
- [5] Zhao Xiang, Lin Jiming. Theoretical limits analysis of indoor positioning system using visible light and image sensor [J]. *Etri Journal*, 2016, 38(6): 5560–5567.
- [6] Moon Myoung-geun, Choi Su-il, Park Jaehyung, et al. Indoor positioning system using LED lights and a dual image sensor [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2015, 19(12): 586–591.
- [7] Wei Ling, Zhang Hongming, Yu Bingyan, et al. Cubic-receiver-based indoor optical wireless location system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1–7.
- [8] Guo Fang, Lian Guofu, Zhang Ning. Positioning precision analysis for three-dimensional target based on compound eye system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4088–4093. (in Chinese)