

基于单目视觉和可见光成像通信的地铁列车定位

张雁鹏^{1,2*}, 朱东亚^{1,2}, 马军民³, 孟楠^{1,2}¹兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;²甘肃省人工智能与图形图像处理工程研究中心, 甘肃 兰州 730070;³成都地铁运营有限公司, 四川 成都 610041

摘要 精确的位置信息是基于通信的列车控制(CBTC)系统保证列车安全运行的关键因素。因此,提出了一种基于可见光成像通信与单目视觉测量的高精度列车定位方法,旨在为列车提供一种精度高、成本低、维护量小且不易受干扰的定位方案。使用单目相机捕捉发光二极管(LED)的光源图像,利用惯性测量单元测量相机的三维姿态角。采用可见光成像通信技术获取LED光源的坐标和形状信息。运用相机成像原理及几何关系得到相机与LED光源的相对坐标,实现列车定位。以实际线路数据以及列车参数为依据的测试结果表明,该方法的定位最大误差为35.56 cm,最小定位误差为1.78 cm,平均定位误差为12.26 cm,能够满足CBTC系统对列车定位精度的要求。

关键词 光通信;基于通信的列车控制;可见光成像通信;列车定位

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1606001

Subway Train Positioning Based on Monocular Vision and Optical Camera Communication

Zhang Yanpeng^{1,2*}, Zhu Dongya^{1,2}, Ma Junmin³, Meng Nan^{1,2}¹School of Electrical and Automation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;²Gansu Provincial Engineering Research Center for Artificial Intelligence and Graphics & Image Processing, Lanzhou 730070, Gansu, China;³Chengdu Metro Operation Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China

Abstract Accurate location information is absolutely vital for communications-based train control (CBTC) systems to ensure safe train running. For the present purposes, a high-precision approach to train positioning is proposed in this paper using optical camera communication and monocular vision measurement, which could present an effective solution to train positioning with high precision, low cost, low maintenance and anti-interference. The images of light emitting diode (LED) lamps are captured by a monocular camera, and the three-dimensional attitude angle of camera is measured by an inertial measurement unit. The coordinates and shape information of LED lamps are obtained by optical camera communication technology. The relative coordinates of the camera and LED lamps are acquired through the imaging principle and geometric relationship to realize the train positioning. According to the real-life line data and train parameters, experimental studies suggest that the maximum error of train positioning in the proposed method is 35.56 cm, the minimum is 1.78 cm, and the average is 12.26 cm, which can meet the requirements of train positioning accuracy for CBTC systems.

Key words optical communications; communications-based train control; optical camera communication; train positioning

1 引言

基于通信的列车控制(CBTC)系统在城市轨道交

通中具有广泛的应用,精确的列车位置信息几乎在CBTC系统所有功能中都可作为重要参数之一。因此,列车定位技术是CBTC系统的关键技术之一^[1]。

收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-06-24; 录用日期: 2021-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(52062028)、甘肃省自然科学基金(18JR3RA106)、兰州交通大学-天津大学联合创新基金(2021060)

通信作者: *zhangyanpeng@lztu.edu.cn

准确实时获取列车位置信息是列车安全、高效运行的前提,高精度的列车位置信息也是实现移动闭塞的关键要素之一^[2]。目前,CBTC系统常用的列车定位方法为测速定位,通过测速传感器确定列车的运行方向和距离,然后计算列车在线路上的实际位置。但测速定位设备在列车前行过程中会产生累积测量误差,需要使用多普勒雷达减少累积误差对定位精度的影响。此外,计轴定位、查询应答器定位、GPS定位、WLAN和LTE等定位技术也是常用的列车定位手段^[3],但这些定位技术都有一定的缺点,如定位精度低、受外部环境影响较大、投资成本高以及后期维护困难等问题。因此,研究一种高精度、低成本的实时列车定位方法具有重要意义。

随着可见光通信(VLC)技术的不断发展以及LED照明系统的广泛应用,VLC技术受到各个领域研究人员的关注^[4]。目前,VLC被广泛应用于地下和水下通信、室内定位和导航车载网络、智慧交通等领域。其中,VLC技术在定位领域的应用是研究的一大热点^[5-6]。基于VLC的定位系统用发光二极管(LED)光源发送信息,接收器通常为光电二极管(PD)或图像传感器(IS),不需要昂贵的设备。其中,采用IS作为接收器的VLC也被称为可见光成像通信(OCC)。地铁隧道通常为封闭的地下环境,一侧会安装照明用的LED光源,且隧道环境相对于大型商场和地下车库等室内环境更加封闭,不易受到自然光以及其他光源的干扰,这为可见光通信提供了良好的应用环境^[7]。此外,与传统的列车定位方法相比,基于OCC的列车定位方法不易受电磁环境干扰,且定位精度较高^[8]。因此,将OCC技术应用到地铁隧道内的列车定位具有广阔的发展前景。

国内外学者针对可见光定位技术进行了大量研究。Xie等^[9]提出利用机器学习的方法识别检测LED光源,然后利用邻近度的定位方法进行定位。Guan等^[10]提出以多个LED光源为信息发送端、以摄像机为接收端的可见光定位系统,通过室内实验得到的最小定位误差为7.06 cm。Zhang等^[11]提出了基于单个

LED光源及其在成像平面投影几何特征关系的定位算法,该算法的平均定位误差为17.52 cm。孙森震等^[12]提出了一种利用双目相机和LED单灯或LED双灯实现室内移动机器人的定位导航,并通过实验证明了该方法的可行性,其最大定位误差为8.5 cm。Fang等^[13]设计了一种新的LED光源调制电路编码方案和轻量级图像处理算法,提高了信息提取的速率,同时开发了基于安卓系统的实时室内定位系统,可在接收端移动速度为18 km/h时达到7.5 cm的定位精度。Trong等^[14]提出了一种利用街道上LED路灯对运行车辆进行定位的方法,实验和仿真结果表明,该方法在车辆速度为100 km/h时可以实现分米级的定位精度。上述研究主要集中在室内定位、机器人导航、汽车定位等方面,较少考虑将VLC应用于CBTC系统的列车定位中。王俊高^[15]从可靠性、安全性、信息量等方面探讨了将VLC技术引入CBTC系统的可行性与优越性,指出VLC技术的引入具有简化CBTC系统结构、减少设备数量与成本、维护方便等优势。地铁隧道内的LED光源布局满足VLC条件,因此,本文提出了一种基于OCC的地铁列车定位方法。首先,以隧道内的LED光源作为信息发送端,周期性发送LED光源的位置和形状信息;然后,以列车头部上方安装的相机作为信息接收端,持续接收LED光源发送的信息;最后,结合相机的成像原理和相机的姿态信息实现列车的精确定位。用相机代替常用的PD作为信息接收设备,可以减少定位所需的LED光源数量,更符合隧道内的LED光源安装场景,且无需改变现有隧道内LED光源的拓扑结构。

2 基于OCC的列车定位原理

2.1 地铁列车定位系统的结构

基于OCC的地铁列车定位方法需要在列车头部上方添加相机,以接收隧道内LED光源发送的信息。此外,还需在车载设备中添加图像处理模块处理相机接收到的信息,定位模块在完成列车定位后,能够将列车位置信息发送给车载控制器(VOBC),基于OCC的地铁列车定位系统结构如图1所示。

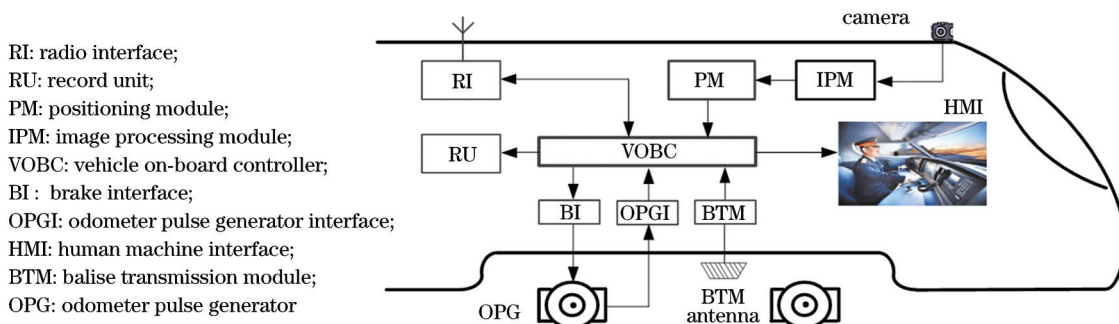


图1 基于OCC的地铁列车定位系统

Fig. 1 Subway train positioning system based on OCC

在 CBTC 系统中,VOBC 将列车位置信息实时传送给地面区域控制器(ZC),ZC 作为实现地面列车自动保护(ATP)的核心设备,可为列车生成移动授权(MA),ATP 依据 MA 为列车计算防护曲线,实现超速防护,确保列车的安全运行。OCC 定位系统在 CBTC 系统中的功能如图 2 所示。MA 的生成原理如图 3 所示。其中, v 为列车的运行速度, s 为列车的行驶距离。

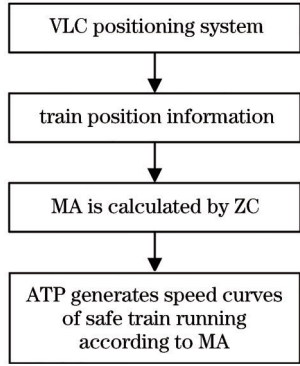


图 2 OCC 定位系统的功能
Fig. 2 Functions of the OCC positioning system

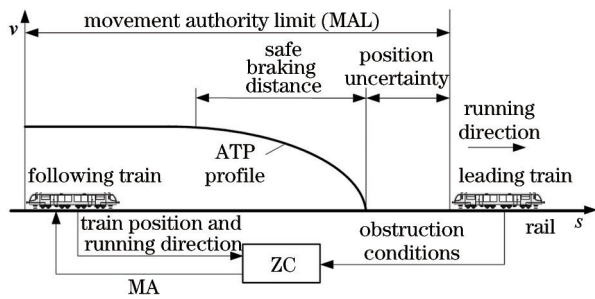


图 3 MA 的生成原理
Fig. 3 Principle of generating MA

2.2 列车定位模型

目前,地铁运营线路多为封闭式隧道,实验仅考虑了地下隧道环境中的列车定位。通常,地铁隧道内一侧会安装 LED 光源,图 4 为列车运行过程中拍摄的隧道内 LED 光源分布情况。可以发现,相机拍摄的图片中会出现多个 LED 光源,因此,图像处理过程中需要对图像中的 LED 光源进行筛选,选取图像中最大的光斑作为信息提取区域。以隧道真实环境为基础建立的隧道内列车定位模型如图 5 所示。其中,相机作为接收器安装在列车头部,在列车运行过程中,相机会按照设定的频率持续接收 LED 光源发送的信息。

在列车定位系统中,普通的圆形 LED 光源作为信息发送端被安装在隧道一侧,每个 LED 光源都分配有唯一的 ID,该 ID 与其位置和形状(直径)信息相关联并存储在 ID 位置数据库中。隧道内的 LED 光源按照特定的频率持续发送自身信息,当列车通过时,相机按照一定的频率捕获 LED 光源图像,同时利用卷帘快门



图 4 列车快速运行中的地铁隧道场景
Fig. 4 Subway tunnel scenario with fast train running

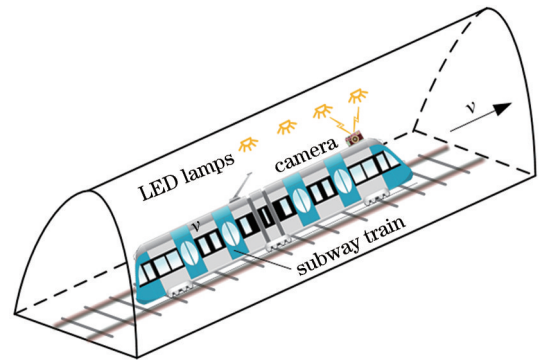


图 5 拱形隧道列车的定位场景
Fig. 5 Train positioning in the scenario of arch tunnel

效应检测调制信号。

2.3 OCC 的信息发送原理

OCC 技术利用荧光灯或 LED 等肉眼看不到的高速明暗闪烁信号传输信息^[16]。OCC 系统包括发射模块和接收模块,发射模块持续发送周期性信息,先对传输数据进行调制,然后通过驱动电使 LED 光源以特定的频率闪烁。文献[17]中设计了一种发送器数据帧结构,该数据帧结构由 25 位 0 和 1 码组成,包括 1 个 8 位的头信息,用于标识数据帧的开始,LED 光源的位置和形状信息分别占据 8 位,最后 1 位为数据帧的尾信息,如图 6 所示。

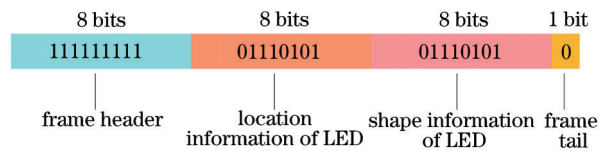


图 6 发送数据帧的结构
Fig. 6 Structure of the sending data frame

2.4 OCC 的信息接收原理

用单目相机作为信息接收端,通过调节相机的曝光时间使其与 LED 光源的闪烁频率相匹配,以拍摄到清晰且明暗相间的条纹图片^[18]。基于 IS 的可见光定

位系统利用互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器的卷帘快门效应实现对LED光源发送信息的识别。CMOS相机通过卷帘快门进行逐行曝光,即每行像素的曝光时间不同,其工作原理如图7(a)所示。第1行曝光结束才会开始读出数据,读出1行需要1行的周期时间(含消隐时间),直至第1行完全读出后,第2行刚好开始读出。依次类推,当第 $N-1$ 行读完后,第 N 行

开始读出,直到整幅图像完全读出。在相机逐行曝光工作方式下可以捕捉到LED光源的明暗条纹图像,从而实现对LED光源发送信息的接收^[19-21]。捕捉的条纹图像如图7(b)所示。其中,明暗条纹表示LED光源的亮灭变化,明条纹代表“1”码,暗条纹代表“0”码^[22]。依次提取图片中的明暗条纹就可以将LED发送的1、0码串提取出来,从而得到LED光源发送的信息。

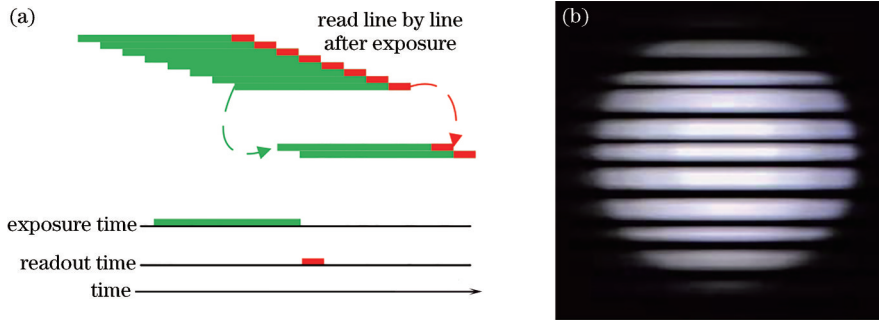


图7 明暗条纹图像的形成原理。(a)相机逐行曝光原理;(b)明暗条纹图像

Fig. 7 Forming principle of images with bright and dark stripes. (a) Principle of the progressive exposure of camera line by line; (b) images with bright and dark stripes

3 可见光成像通信列车定位方法

可见光定位系统的结构如图8所示。其中,LED光源的世界坐标已知,ID信息保存在STM32中。首先,通过驱动电路实现对LED光源通断状态的控制,通过LED光源重复发送ID信息。然后,通过相机的卷帘机制捕捉条纹图像,并使用惯性测量单元(IMU)

获得所需的角速度信息,捕捉的图像经过图像处理进行解码并通过数据库查询得到LED光源的位置信息和形状信息,利用最小二乘法对处理后的图像进行拟合,得到LED光源投影的方程和几何特征^[23]。最后,通过获得的信息和坐标系之间的转换关系得到接收机在世界坐标系中的位置。

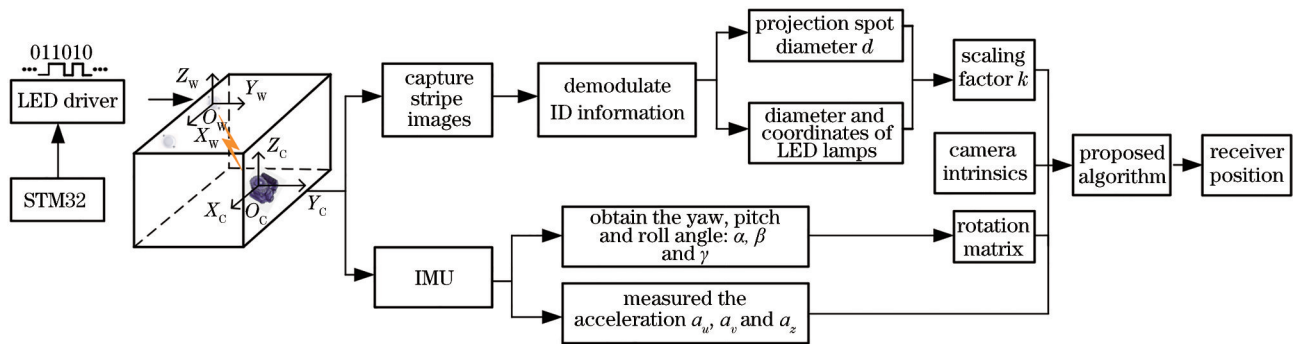


图8 基于OCC的列车定位系统结构

Fig. 8 Structure of the train positioning system based on OCC

3.1 列车精确定位原理

列车定位方法主要依据OCC技术以及相机的成像原理。通过分析LED光源在世界坐标系与相机坐标系之间的相对关系以及已知的LED光源世界坐标,得到相机在世界坐标中的实际位置。图9为相机的成像原理。其中: $O_w-X_wY_wZ_w$ 为世界坐标系,即需要获取相机在该坐标系中的位置才能确定列车的实际位置; $O_c-X_cY_cZ_c$ 为相机坐标系,可以作为图像坐标系和世界坐标之间的桥梁,其以相机(固定在列车顶部)光

心为原点,单位为m; $u-v$ 为像素坐标系,也是所有坐标系中的最小单位,可通过该坐标系得出投影在图像中的具体位置坐标,然后通过公式转换为物理单位pixel; P 为实际物体; p 为物体在相机平面的投影; f 为相机焦距,可通过出厂参数或张正友标定法获取^[24]。

在实验装置中安装圆形LED光源,其中心点为 I ,每一个LED光源(P 点)在世界坐标系中的坐标 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 与像素坐标系中坐标 $p(u, v)$ 之间的关系^[24]可表示为

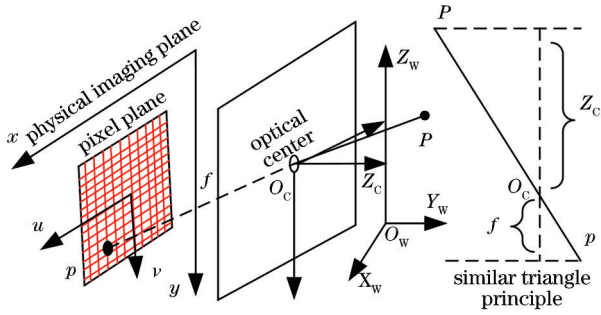


图 9 小孔成像原理

Fig. 9 Principle of the keyhole imaging

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中： (u, v) 为LED光源中心投影在像素坐标系中的坐标； d_x 和 d_y 为单位长度的像素数，可将像素单位转为物理单位； \mathbf{T} 为三维平移矢量； (X_w, Y_w, Z_w) 为LED光源在世界坐标系中的位置，可通过LED光源发送的ID信息获得； \mathbf{R} 为旋转矩阵； α, β, γ 分别为相机坐标系与世界坐标系在X轴、Y轴、Z轴的旋转偏差，即滚转角、俯仰角、偏航角，可由IMU测得后发送至计算机作为定位方法的辅助参数。

3.2 列车位置估计

列车定位实际上就是求解相机世界坐标的过程，即利用式(1)求解相机的世界坐标，因此对于 Z_c 和 \mathbf{T} 的求解是实现列车定位的关键。列车定位过程中，由于相机放置高度和角度的关系，隧道内的LED光源可能不在同一平面上，导致相机成像平面与LED光源平面之间会存在两种状态，即相互之间水平和倾斜，且两种状态下相机的成像情况不同，因此，需要对两种状态下的 Z_c 和 \mathbf{T} 分别进行求解。

相机平面与LED光源平面平行情况下，LED光源在像平面上的投影为圆形，如图10所示。其中，以 I 为中心的圆代表隧道内的照明LED，以 I' 为中心的椭圆是LED光源在车载相机成像平面上的投影， O_c 为相机镜头的中心， PQ 为LED光源的直径， $P'Q'$ 为LED光源投影的直径。

由图10和几何关系可知， $\Delta IMO_c \sim \Delta I'OO_c$ ，根据相似三角形性质，得到

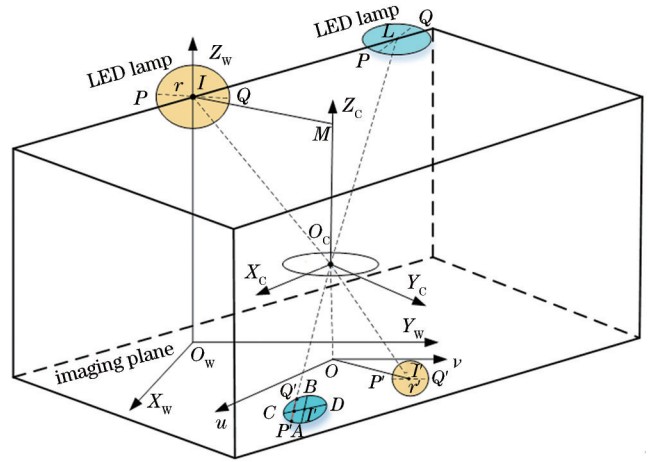


图 10 LED光源在像平面上的投影

Fig. 10 Projection of LED lamps on the imaging plane

$$\frac{IM}{I'O} = \frac{O_c M}{O_c O} = \frac{IQ}{I'Q'}, \quad (3)$$

$$Z_c = O_c M = \frac{IQ}{I'Q'} \times O_c C = \frac{r}{r'} \times f, \quad (4)$$

式中： $O_c M$ 可看作式(1)中的 Z_c ，即相机中心到LED光源平面的高度； IQ 为LED光源的半径 r ； $O_c M \gg f$ ， $O_c O \approx f$ 。平行情况下，LED光源在像素平面的投影为圆形， $I'Q'$ 为拟合圆的半径 r' 。

当LED光源与相机平面不平行时，相机主轴LED光源平面之间不再平行，此时，LED光源在成像平面上的投影为椭圆形，中心投影与拟合椭圆的质心位置存在偏差，如图11所示。以 I 为中心的圆代表隧道内的照明LED光源，以 I' 为中心的椭圆是LED光源在相机成像平面上的投影， CD 为椭圆的长轴， AB 为通过 I' 与 $P'Q'$ 平行的弦。弦 AB 的求解原理如图12所示。

式(4)可以转换为

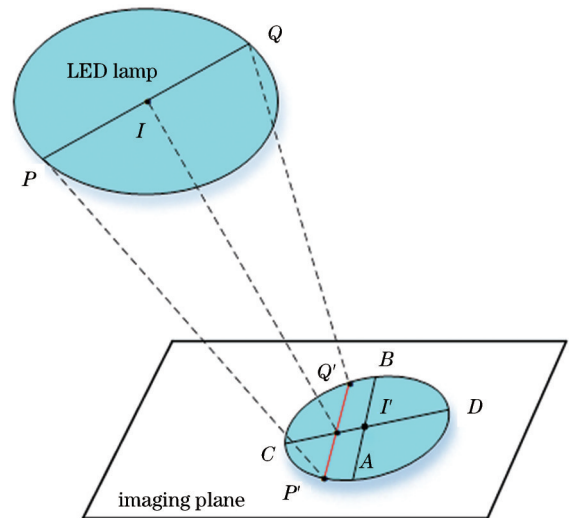


图 11 倾斜状态下LED光源的投影模型

Fig. 11 Projection model of LED lamps under the titled conditions

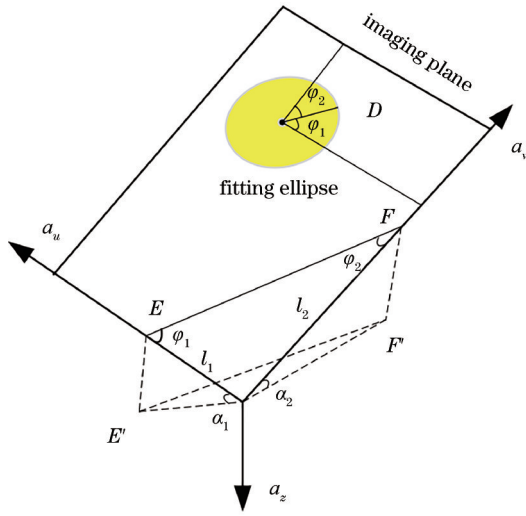


图 12 弦 AB 的求解原理

Fig. 12 Solving principle of the subtense AB

$$Z_{c1} = \frac{2r}{P'Q'} \times f, \quad (5)$$

$$Z_{c2} = \frac{2r}{CD} \times f, \quad (6)$$

$$Z_{c3} = \frac{2r}{AB} \times f, \quad (7)$$

式中, $P'Q'$ 为 LED 光源在成像平面的直径。因此, 根据式(5)计算的 Z_{c1} 更符合理论值。但实际情况下 $P'Q'$ 的位置无法确定, 导致无法求取 $P'Q'$ 。为了解决该问题, 文献[11]提出了使用拟合椭圆的长轴(CD)替代 r' 计算 Z_c , 但该方法的定位误差较大。计算 Z_{c1} 、 Z_{c2} 和 Z_{c3} 时, $CD > AB > P'Q'$, 因此, $Z_{c2} < Z_{c3} < Z_{c1}$ 。由于 Z_{c1} 无限接近 Z_c , 且相比 Z_{c3} 更加接近 Z_c , 因此, 本方法用 AB 代替 $P'Q'$, 极大提高了系统的定位精度。但 AB 并非已知参数, 需要通过计算得出。

AB 的求解原理: 假设 EF 为 LED 光源平面和图像平面之间的相交线, EF 和像素坐标系两个坐标轴 u 、 v 之间的角度为 ϕ_1 、 ϕ_2 , $E'F'$ 为 EF 在水平面上的投影, 由几何关系得到

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2}, \quad (8)$$

$$\phi_1 + \phi_2 = \pi/2, \quad (9)$$

式中, α_1 、 α_2 为像素坐标系中 u 、 v 坐标轴与水平面之间的夹角, 可表示为

$$\arcsin(a_z/a_u) = \alpha_1, \quad (10)$$

$$\arcsin(a_z/a_v) = \alpha_2, \quad (11)$$

$$Z_c = \frac{r}{BL'} \times f, \quad (12)$$

式中: a_u 、 a_v 为 u 、 v 方向上的加速度; a_z 为重力加速度, 可由 IMU 测得。 BL' 的长可结合式(8)~式(11)和拟合椭圆方程求得。将式(12)计算的 Z_c 代入式(1), 就能得到参数 T 。

求解出 Z_c 和 T 之后, 得到相机坐标系和世界坐标系之间的坐标转换关系^[25]为

$$P_c = R \times P_w + T, \quad (13)$$

$$P_w = R^{-1} \times (P_c - T), \quad (14)$$

式中: P_c 为接收器在相机坐标系中的坐标; P_w 为相机在世界坐标系中的坐标。通过式(14)可以计算出接收器的世界坐标位置, 再结合已知的列车长度以及相机安装位置得到列车的精确位置。

3.3 基于 VLC 的列车定位模型

为了使用本方法对运行中的列车进行实时定位, 建立了列车匀速运动模型、OCC 定位观测模型和定位误差模型。其中, 误差模型用于分析列车的定位结果及误差分布^[26]。在列车运动模型中, 用 $X(k)$ 表示列车在采样时刻 kT_0 处的真实位置, 利用 OCC 定位方法获得列车的估计位置。设 kT_0 时刻列车的运行速度为 $V(k)$, 则列车匀速运动模型可表示为

$$X(k+1) = X(k) + V(k)T_0 + 1/2 [T_0^2 w_1(k)], \quad (15)$$

$$V(k+1) = V(k) + T_0 w_2(k), \quad (16)$$

式中, $w(k)$ 为由空气阻力、摩擦力等产生的干扰, 假定其是均值为 0、方差为 δ_w^2 的白噪声。在模拟列车实际运行的过程中, 列车的状态包括位置和速度, 即状态方程 $Y(k) = [x, v_x, y, v_y]^T$ 可表示为

$$Y(k+1) = \Phi X(k) + \Gamma w(k), \quad (17)$$

$$\text{式中: } \Phi = \begin{bmatrix} 1 & T_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \Gamma = \begin{bmatrix} T_0^2/2 & 0 \\ T_0 & 0 \\ 0 & T_0^2/2 \\ 0 & T_0 \end{bmatrix}。$$

3.4 基于 OCC 的列车定位误差模型

为了更加直观地测试定位算法的性能, 定义误差函数计算各时刻的定位误差, 误差函数可表示为

$$e = \sqrt{(x_k - m_k)^2 + (y_k - n_k)^2}, \quad (18)$$

式中: (x_k, y_k) 为 k 时刻列车的真实坐标; (m_k, n_k) 为 k 时刻该定位方法得到的列车位置坐标。

4 仿真实验结果与分析

4.1 仿真实验设计

为了验证基于 OCC 的地铁列车定位系统的性能, 在实验室模拟搭建隧道实验环境, 采集条纹图像进行分析, 如图 13(a) 所示。其中, 在搭建实验环境的左侧安装 LED 光源, 距离地面的垂直高度为 1.2 m, 间隔为 1 m。LED 光源为定位系统中的信息发送端, 能以 2 kHz 的频率持续发送其 ID 信息及形状信息; 接收端使用了 Teledyne DALSA 公司生产的 NANO-CL-4060 高速面阵相机, 相机被固定在车上, 以给定的速度前进拍摄图片, 通过数据线传送到计算机进行处理, 得到的数据可作为仿真实验中的参数。

图 13(b) 为实验环境的设备。为了使仿真环境更符合线路实际环境, 采用成都地铁 1 号线的真实线路数

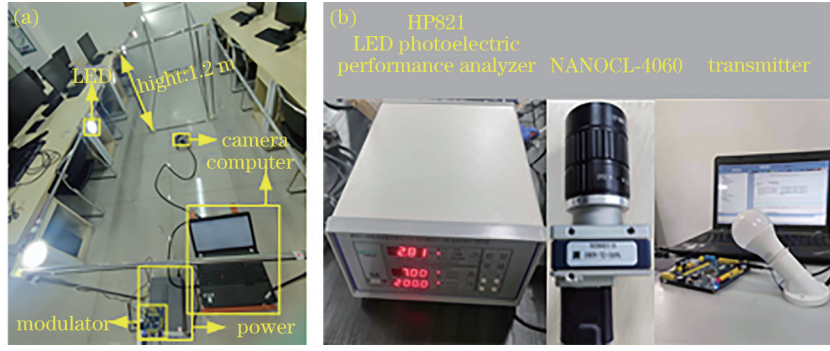


图 13 实验环境及设备。(a)实验环境;(b)实验设备

Fig. 13 Experimental environment and equipment. (a) Experimental environment; (b) experimental equipment

据和设备参数,选取的路段为孵化园站到新益州站隧道区间,隧道中LED光源之间的水平间隔为10 m,隧道的宽为5 m,车型为B型车(长、宽、高分别为19.52 m、2.80 m、3.80 m),利用实际参数仿真验证本方法的有

效性,具体仿真参数如表1所示。其中,空间坐标参数是以成都地铁1号线的实际参数作为依据设定,LED光源参数依据产品规格说明书给出,相机参数根据资料《Genie Nano-CL Series》得出。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
LED rated power /W	5
LED diameter /cm	5
Location unit size($L \times W \times H$) /($m \times m \times m$)	$10.0 \times 5.0 \times 5.0$
Coordinates of two LED lamps /m	$(0, -2.5, 5), (10, -2.5, 5)$
Vertical distance between camera and LED lamps /m	1.2
Focal length /mm	17.52
Image size /($pixel \times pixel$)	4112×2176
Pixel size /($\mu m \times \mu m$)	3.45×3.45
Horizontal field angle /($^\circ$)	56.3
Maximum frame rate of the camera /($frame \cdot s^{-1}$)	87.6

4.2 定位单元仿真测试与结果分析

相机在隧道内的视场角受其与距隧道壁间距离和偏转角的影响,设计的仿真实验共包含三种情况:1)相机放在列车中间位置,同时向LED光源偏转(方

案1);2)相机放在列车靠近LED光源的一侧,无偏转(方案2);3)相机放在靠近LED光源的一侧,同时向LED光源偏转(方案3),具体实验场景如图14所示。

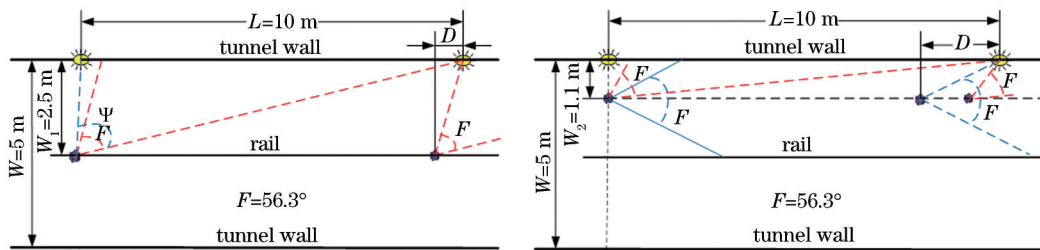


图 14 视场角的变化原理

Fig. 14 Changing principle of the field of view

从图14可以发现,相机的偏转角度会对相机视场角范围产生一定的影响,为了验证偏转角度与视场角范围的关系,在进行实验仿真前先对成像范围受视场角和偏转角的关系进行求解。以实验室走廊模拟封闭隧道环境,不同位置下相机的最大偏转角 ψ (相

机在距离LED光源一侧隧道不同距离时的极限偏转角,一旦超出该范围,相机会出现捕捉不到LED光源的情况)和不同偏转角下相机的视野极限距离 D_{limit} (单个定位单元内出现第一次视野丢失的极限距离)可表示为

$$\phi = 90^\circ - \arctan(L/W_i) + \frac{F}{2}, i = 1, 2, \quad (19)$$

$$D_{\text{limit}} = W_i \times \tan(90^\circ - \phi - F/2), \quad (20)$$

式中, W_i 为相机与隧道壁之间的垂直距离。

以两个光源之间的空间为一个定位单元, 以 LED 1 为起始点, LED 2 作为定位参考点: 设起始点光源中心坐标为 $(0 \text{ m}, -2.5 \text{ m}, 5 \text{ m})$, 参考点光源中心坐标为 $(10 \text{ m}, -2.5 \text{ m}, 5 \text{ m})$; 隧道长方向为 X 轴, 列车前进方向为正; 横向为 Y 轴, 装有 LED 光源的一侧为负。为了验证视场角在定位过程中对定位方法的影响设计了三种实验方案: 1) 相机放在列车靠近 LED 光源一侧, 起始点坐标为 $(0 \text{ m}, -1.4 \text{ m}, 3.8 \text{ m})$, 视场角中线与 X 轴平行; 2) 相机放在列车靠近 LED 光源的一侧, 起始点坐标为 $(0 \text{ m}, -1.4 \text{ m}, 3.8 \text{ m})$, 视场角中线与 X 轴的夹角为 -34° ; 3) 相机放在列车中间位置, 起始点坐标为 $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 3.8 \text{ m})$, 视场角中线与 X 轴的夹角为 -42° 。在单元内进行测试时每隔 0.5 m 取一个定位测试点, 共选取 20 个定位点, 分别在三种情况下进行测试, 定位单元示意图如图 15 所示。

单元内的定位仿真结果如图 16(a) 所示。可以发现, 相机距隧道壁 1.1 m 且视场角中线与 X 轴的夹角为 -34° 时, 定位方法的效果最好, 只在最后 2 个定位点出现定位本单元内的 LED 光源视野丢失情况, 且

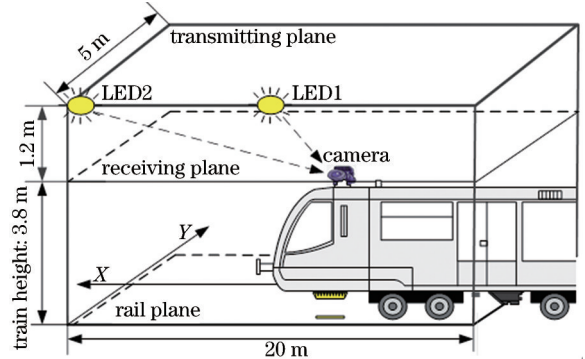


图 15 列车定位单元示意图

Fig. 15 Schematic diagram of the train positioning unit

定位精度比其他两种情况更精确。当视野本单元内的 LED 光源视野丢失时并不会对定位方法产生影响, 可以以下一个定位单元内的 LED 光源为定位参考点进行定位, 之后误差突然增大的原因也是视野丢失。图 16(b) 为三种情形下的定位误差, 图 16(c) 为相机距离 LED 光源垂直高度不同时定位仿真结果。该仿真实验提前将相机放在距隧道壁 1.1 m 的位置, 并在视场角中线与 X 轴的夹角为 -34° 时, 分别取相机距 LED 光源的垂直距离为 $0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 \text{ m}$ 。可以发现, 当相机距 LED 光源的垂直距离为

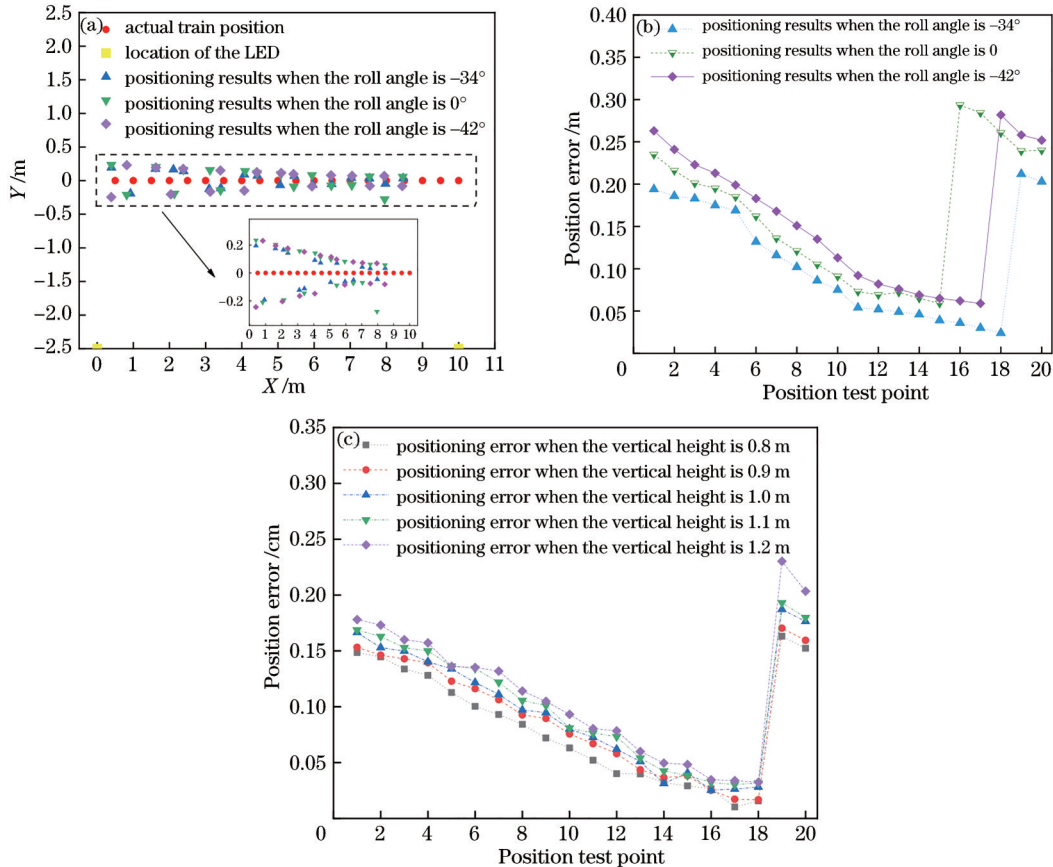


图 16 实验结果。(a) 定位单元内的实验结果; (b) 不同相机机位时的实验结果; (c) 不同高度时的实验结果
Fig. 16 Experiment results. (a) Experiment results in the positioning unit; (b) experiment results for different camera positions and postures; (c) experiment results at different heights

0.8 m 时定位精度最高且算法最稳定,之后定位精度随着高度的增加逐渐降低。

4.3 运行列车的实时定位仿真结果分析

为了验证定位方法的动态定位性能,用 Matlab 仿真软件对定位方法进行动态仿真实验。将列车的初始坐标设置为(0,0),X 方向的速度 $v_x=22$ m/s,Y 方向的速度 $v_y=0$ m/s,则初始 $\mathbf{Y}(0)=[0,22,0,0]$ 。用本方法在 Matlab 软件中对模拟运行中的列车进行定位,运行轨迹及定位结果如图 17(a)所示,列车的实时定位误差如图 17(b)所示。可以发现,本方法在列车运动定位仿真测试中的最大定位误差为 35.56 cm,

最小定位误差为 1.78 cm,平均定位误差为 12.26 cm,定位精度符合 IEEE 1474.1 标准中对于 CBTC 列车位置测量分辨率(0.25~6 m)的要求,且 90% 以上的定位测试点满足在未安装安全门情况下停站的定位精度要求(0.25 m)。所提定位方法的最大定位误差与最小定位误差的差值较大,为 33.78 cm。原因可能是列车在运行过程中拍摄图片受视场角以及相机与 LED 光源之间距离的影响,且 IMU 测得的各个方向上的偏转角与加速度有关。尽管定位误差有所波动,但均符合 IEEE 1474.1 对于列车定位精度的要求。

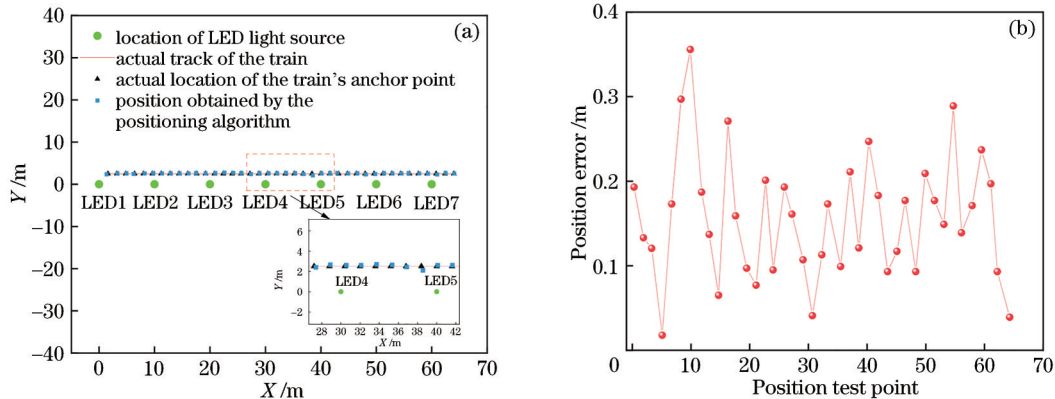


图 17 列车运行时的仿真结果。(a)仿真结果;(b)定位误差

Fig. 17 Simulation results when the train is running. (a) Simulation results; (b) positioning error

5 结 论

将 OCC 引入地铁列车定位中,用隧道内的 LED 光源作为定位系统中的信息发送端,用相机作为信息的接收端,IMU 为辅助设备,并结合相机的成像原理和姿态信息实现列车的精确定位。实验结果表明,相比现有的列车定位方法,该方法不仅成本低,且后期维护方便。首先,提出并验证了在不同隧道环境下相机放置位置与偏转角和极限视野距离的公式。然后,通过搭建实验室环境验证 OCC 系统的性能,并以成都地铁 1 号线的设备参数为依据,用 Matlab 软件对定位方法进行仿真实验。以成都地铁 1 号线隧道环境为仿真参数的情况下,本方法在方案 3 中的定位效果最好,且定位误差会随 LED 光源与相机垂直距离的减小而减小。Matlab 软件的仿真结果表明,动态定位环境下本方法的最大定位误差为 35.56 cm,最小定位误差为 1.78 cm,平均定位误差为 12.26 cm,满足 IEEE 1474.1 标准对 CBTC 系统定位精度的要求,可作为 CBTC 系统列车定位方法的补充或备选方案,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] 宁滨, 刘朝英. 中国轨道交通列车运行控制技术及应用[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 1-9.

Ning B, Liu C Y. Technology and application of train operation control system for China rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 1-9.

[2] IEEE-SA Standards Board. IEEE Std 1474.1TM -2004, IEEE standard for communications based train control (CBTC) performance and functional requirements[S]. New York: IEEE Press, 2004.

[3] 王迪, 陈光武, 杨厅. 基于 BDS 和 RFID 的现代有轨电车定位信号完整性研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(11): 71-76.

Wang D, Chen G W, Yang T. Study on positioning signal integrity of modern tram based on BDS and RFID [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(11): 71-76.

[4] Lu H, Ba B, Cui W J. A novel fusion visible light location algorithm based on RSSI and imaging of LEDs [J]. Procedia Computer Science, 2017, 107: 848-854.

[5] Liu H, Darabi H, Banerjee P, et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2007, 37(6): 1067-1080.

[6] Ergul O, Dinc E, Akan O B. Communicate to illuminate: state-of-the-art and research challenges for visible light communications[J]. Physical Communication, 2015, 17: 72-85.

[7] 张雁鹏, 胥亚丽, 马军民, 等. 基于可见光通信和接收信号强度检测的列车定位方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(2): 485-493.

- Zhang Y P, Xu Y L, Ma J M, et al. A novel method of train positioning using visible light communication and received signal strength indication[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(2): 485-493.
- [8] IEEE-SA Standards Board. IEEE Std 802. 15.7 TM-2018, IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 15.7: short-range optical wireless communications [S]. New York: IEEE Press, 2018.
- [9] Xie C Y, Guan W P, Wu Y X, et al. The LED-ID detection and recognition method based on visible light positioning using proximity method[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 1-16.
- [10] Guan W P, Wu Y X, Wen S S, et al. A novel three-dimensional indoor positioning algorithm design based on visible light communication[J]. *Optics Communications*, 2017, 392: 282-293.
- [11] Zhang R, Zhong W D, Kemao Q, et al. A single LED positioning system based on circle projection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1-9.
- [12] 孙森震, 李广云, 冯其强, 等. 可见光通信与双目视觉的室内定位[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 834-843.
Sun S Z, Li G Y, Feng Q Q, et al. Indoor positioning based on visible light communication and binocular vision [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 834-843.
- [13] Fang J B, Yang Z, Long S, et al. High-speed indoor navigation system based on visible light and mobile phone [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 16811511.
- [14] Trong H, Myungsik Y. Visible light communication based vehicle positioning using LED street light and rolling shutter CMOS sensors[J]. *Optics Communications*, 2018, 407(8): 112-126.
- [15] 王俊高. 基于可见光通信的城市轨道交通列车控制技术的前景与挑战[J]. *城市轨道交通研究*, 2016, 19(10): 1-4.
Wang J G. Potential application and challenges for urban rail transit control technology based on visible-light communication[J]. *Urban Mass Transit*, 2016, 19(10): 1-4.
- [16] Karunatilaka D, Zafar F, Kalavally V, et al. LED based indoor visible light communications: state of the art[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [17] Ji Y Q, Xiao C X, Gao J, et al. A single LED lamp positioning system based on CMOS camera and visible light communication[J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 48-54.
- [18] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.
- [19] 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.
Wang Y, Zhao H D. VLC/PDR particle filter fusion indoor positioning based on smartphone[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0706001.
- [20] Yang N, Wang R, Gao X, et al. Challenges in monocular visual odometry: photometric calibration, motion bias, and rolling shutter effect[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(4): 2878-2885.
- [21] Guan W P, Zhang X J, Wu Y X, et al. High precision indoor visible light positioning algorithm based on double LEDs using CMOS image sensor[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2019, 9(6): 1238-1247
- [22] He J, Jiang Z W, Shi J, et al. A novel column matrix selection scheme for VLC system with mobile phone camera[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(2): 149-152.
- [23] Gander W, Golub G H, Strelbel R. Least-squares fitting of circles and ellipses[J]. *BIT Numerical Mathematics*, 1994, 34(4): 558-578.
- [24] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 52-88.
Ma S D, Zhang Z Y. Computer vision: computing theory and algorithmic basis[M]. Beijing: Science Press, 1997: 52-88.
- [25] 冯立辉, 江明, 韩大海, 等. 可见光室内定位技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
Feng L H, Jiang M, Han D H, et al. Indoor visible light positioning technologies[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2020.
- [26] 黄小平, 王岩, 缪鹏程. 目标定位跟踪原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
Huang X P, Wang Y, Miao P C. Principle and application of target positioning and tracking[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2018.