

融合可见光通信与双目立体视觉的地铁列车自主定位

张雁鹏^{1,2*}, 孟楠^{1,2}, 肖夏³, 朱筱琪^{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天津大学微电子学院, 天津 300072

摘要 为提高隧道环境下列车的定位精度,提出了一种基于可见光通信与双目立体视觉的列车自主定位方法。首先,列车根据安装在隧道壁上发光二极管(LED)光源的光信号实时接收LED光源对应的唯一标识符(UID)。然后,运用灰度重心法和最小二乘法,列车获取LED光源图像中光斑中心的像素坐标。接着,利用双目立体视觉原理,得到列车初始定位结果。最后,采用维纳滤波器和惯性测量单元(IMU)补偿列车运行引起的定位误差,得到列车实时定位结果。结合成都地铁1号线的线路数据和设备信息来验证列车自主定位方法的可行性和有效性,研究表明:该方法最大静态定位误差为29.93 cm;当列车在不同速度下运行时,最大定位误差为36.11 cm,满足列车控制系统的定位要求。

关键词 光通信; 可见光通信; 列车定位; 双目立体视觉; 车车通信

中图分类号 TN929.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221912

1 引言

城市轨道交通具有安全性高、运量大、速度快、占地面积小和污染少等优点,为市民绿色出行提供了极大的便利。随着通信技术的飞速发展,基于通信的列车控制(CBTC)系统对地铁安全高效地运行发挥着至关重要的作用^[1]。近年来,为了进一步缩短行车间隔和减少轨旁设备,基于车车通信的列车控制系统的研究逐渐兴起,列车被视为有自主行为的个体,根据当前位置、当前速度和前方障碍物等情况生成列车速度控制曲线。然而,在狭窄封闭的隧道内,车车通信过程可能会存在通信网络同频干扰、邻频干扰和通信网络以外的无线设备干扰等问题,这会导致运行中的列车通信中断,失去定位,进而触发紧急制动或产生安全事故^[2-3]。

作为新兴的通信技术,可见光通信(VLC)具备可移植性好、频谱资源免申请和抗电磁干扰能力强等优势,近年来在室内定位、水下通信和车辆定位等领域中逐渐成为了研究热点^[4]。地铁隧道环境具备应用VLC的条件,隧道壁上安装的发光二极管(LED)可以同时实现照明和通信功能,列车在经过LED光源时实时接收光信号。VLC技术有极大潜力应用于面向车车通

信(CBTC)系统中,从而实现列车自主定位^[5]。

现有的VLC方法大多以LED光源作为发送端,通过调制电路或微控制芯片进行二进制调制编码来控制LED光源快速亮灭,进而实现特定信息的传递。接收端采用非成像或成像方式接收信息,进而实现通信。可见光非成像接收方式以光电探测器(PD)作为VLC接收端,利用三边定位法实现定位,这种方法计算简单,但至少需要接收三个LED光源的光照强度才能确定自身位置,易受光的散射、反射等影响,对收发端性能要求高^[6-7]。可见光成像接收方式多以单目视觉系统作为VLC接收端,采用互补金属氧化物半导体(CMOS)相机摄取LED光源图像,通过图像处理检测LED光源像素区域,并将得到的图像信号转化为数字信号,进而实现通信。若通过单目视觉系统实现VLC的定位功能,则CMOS相机需要摄取多个不共线的LED光源的信息,或通过单个LED光源在图像中的大小估计收发端距离。由于单目视觉只能采集二维信息,故为达到较高的识别率和定位精度,该方法需要建立一个庞大的样本数据库,并实时维护^[8-11]。双目立体视觉系统作为机器视觉的另一种重要形式,利用左右相机在不同角度同时摄取物体图像,通过绝对差值和(SAD)匹配、半全局块匹配(SGBM)等算法评估图像相似度,进而得到

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2022-11-29; 录用日期: 2022-12-19; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(62066024)、甘肃省高等学校青年博士基金(2022QB-068)、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

图像视差,这样便可直接获取物体的三维信息。由此可见,双目立体视觉系统更适用于真实道路环境和运动物体的测量,被广泛应用于目标定位、目标识别跟踪等领域中^[12-15]。因此,双目立体视觉系统同样可以作为 VLC 接收端,实现 VLC 的定位功能^[16]。

基于此,本文提出了一种基于 VLC 与双目立体视觉的地铁列车自主定位方法,实现了隧道环境下面向车车通信的 CBTC 系统列车实时自主定位。根据 VLC 原理,获取 LED 光源位置信息。采用双目立体视觉系统作为接收端,在不同角度同时摄取单个 LED 光源图像,再利用灰度重心法与最小二乘法提取 LED 光源中心作为单特征点进行匹配,进而降低所提自主定位方法的计算复杂度。结合成都地铁 1 号线的真实运营数据,建立列车自主定位模型。为了反映列车运

行的实际情况,采用维纳滤波对接收端的运动模糊进行补偿,利用惯性测量单元(IMU)实时测量接收端的姿态角,降低机械振动引起的定位误差,提高列车自主定位精度。

2 列车自主定位原理

2.1 隧道内地铁列车自主定位场景

通常,地铁隧道内沿列车运行方向左侧的隧道壁上每隔 10 m 布置一个 LED 光源。以隧道壁上 LED 光源作为 VLC 的发送端,选取双目立体视觉系统作为 VLC 的接收端,固定在列车头部的载体平台上,左右相机实时摄取 LED 光源图像,实现 LED 光源与列车的通信。以圆形隧道为例,隧道内地铁列车自主定位场景如图 1 所示。

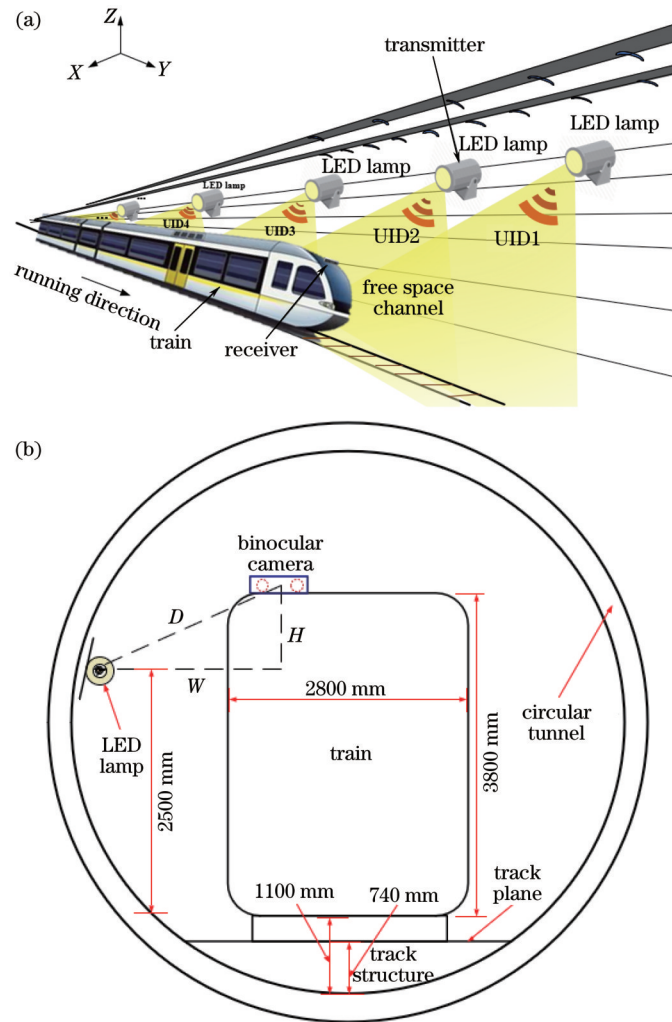


图 1 隧道内列车自主定位场景。(a)基于 VLC 的列车运行场景;(b)地铁隧道断面图

Fig. 1 Scenario of autonomous train positioning in tunnel. (a) Running train with VLC; (b) cross-sectional view of metro tunnel

双目立体视觉系统实时摄取 LED 光源图像,双目 CMOS 视觉传感器通过卷帘快门方式曝光,采用逐行扫描的方法将二维平面上的光信号离散成行。不同行像元曝光时间不同,且扫描频率高于 LED 光源的闪烁频率,故 LED 光源图像呈现以唯一标识符(UID)为规

律的明暗条纹,车载设备可以按空间顺序从中提取在一维时间轴上变化的数字信号^[8]。UID 包括帧头、数据块和帧尾,其中数据块由列车所在线路编号和 LED 光源编号对应的二进制数字编码而成。车载设备以帧头和帧尾作为帧定界的标志,从所得的数字信号中提

取出 UID, 查找车载数据库中储存的 UID 和 LED 光源实际位置对应的关系表, 得到当前 LED 光源的坐标位

置, 实现列车与 LED 光源的通信。基于 CMOS 的 VLC 流程如图 2 所示。

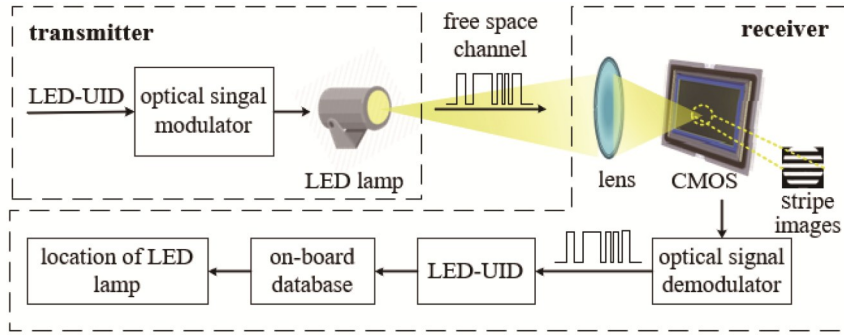


图 2 基于 CMOS 的 VLC 流程
Fig. 2 VLC process based on CMOS

2.2 条纹识别

双目 CMOS 视觉传感器每次摄取两张存在位置偏差且明暗条纹宽度不规律的 LED 光源图像, 并将摄取的图像实时传输至车载设备中。车载设备对接收端摄取的 LED 光源图像进行处理, 可以识别出 UID 信息^[9]。接收端摄取到的 LED 光源条纹图像如图 3 所示。

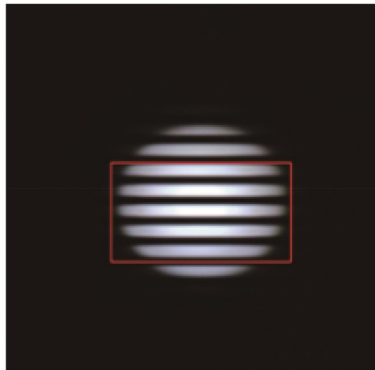


图 3 LED 光源条纹图像
Fig. 3 Stripe image of LED lamp

由于双目 CMOS 视觉传感器的左右相机在同一时刻摄取的 LED 光源图像仅存在位置偏移, 但条纹相同, 故为降低计算量, 仅对左相机摄取的图像进行 UID 信息识别。在进行信息识别之前判断左相机摄取的光源是否完整, 若不完整, 则对右相机摄取的图像进行 UID 信息识别。

UID 信息识别过程描述为: 车载设备将摄取的 RGB 图像灰度化, 降低图像所占内存, 使用中值滤波保护图像条纹尖锐边缘; 采用最大类间方差 (OTSU) 法找到适合的二值转换阈值, 得到二值化图像, 即灰度值只有 255 和 0 的黑白条纹光斑; 选取条纹像素区域为感兴趣区域 (ROI), 校正角度后进一步裁剪, 得到 LED 光源的条纹识别图像如图 4 所示; 根据黑白条纹像素宽度进行识别, 黑色条纹为“0”, 白色条纹为“1”, 得到一组二进制数据, 从中提取 UID 信息。



图 4 LED 光源图像条纹识别
Fig. 4 Stripe recognition of LED lamp image

3 列车自主定位方法

根据地铁隧道内列车与隧道壁上 LED 光源之间的通信, 得到当前 LED 光源在世界坐标系中的空间位置, 并将该信息作为列车定位的参考信息。车载设备通过灰度重心法与最小二乘法提取 LED 光源图像的光斑中心, 使用两种方法的加权平均值作为特征点, 融合车载双目立体视觉进行单特征点匹配, 求解列车与 LED 光源的相对位置, 通过转换坐标系得到列车在世界坐标系中的位置。结合列车真实运行情况, 利用维纳滤波和 IMU 进行运动补偿, 实现列车自主定位, 列车定位步骤如图 5 所示。

3.1 基于灰度重心与最小二乘法的光斑中心提取

为了确保光斑中心提取的精确度和实时性, 以灰度重心法和最小二乘法提取的光斑中心坐标加权平均值作为光斑中心的像素坐标系坐标。

采用灰度重心法提取光斑中心可以有效减小灰度分布不均匀导致的误差, 计算速度快、实时性好。另外, 由于双目 CMOS 视觉传感器与 LED 光源存在倾斜度和 LED 光源自身的晕光效应, 故光斑多呈椭圆状, 此时可以采用最小二乘法拟合椭圆, 在 LED 光斑图像边缘取多个点确定一个唯一椭圆, 提取光斑拟合中心。双目立体视觉透视投影模型如图 6 所示。

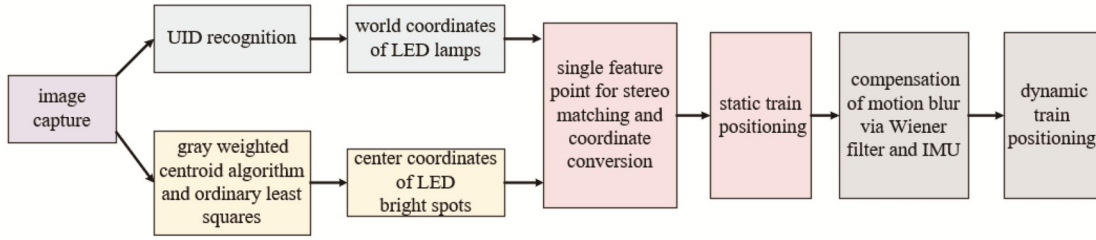


图 5 列车定位步骤

Fig. 5 Steps of train positioning

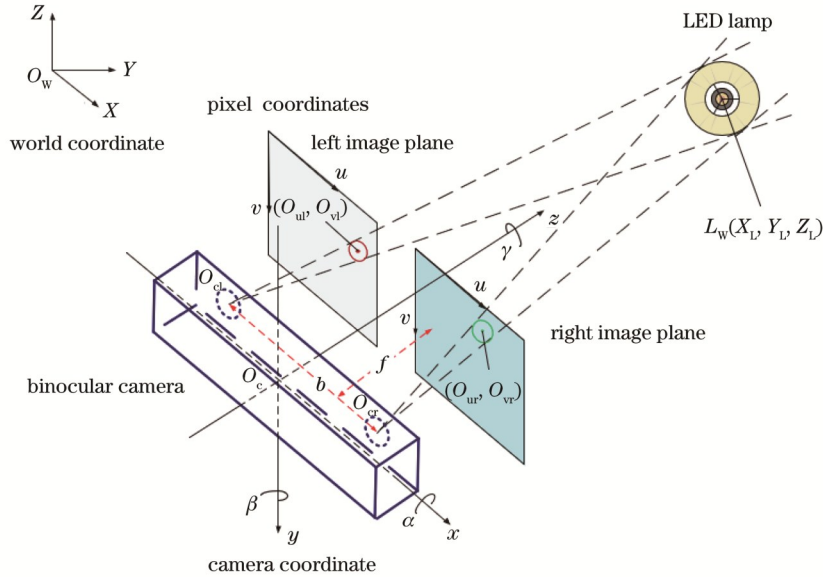


图 6 双目立体视觉透视投影模型

Fig. 6 Perspective projection model of binocular stereo vision

提取光斑中心之前,对二值化后的黑白光斑条纹图像进行形态学操作,使条纹区域连通成完整的白色光斑。接收端图像处理步骤如图 7 所示。

3.1.1 基于灰度重心法的光斑中心提取

以左相机图像为例,LED 光源图像灰度分布的二维高斯分布函数^[17-18]可以表示为

$$g(u, v) = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(u - u_{gl})^2 + (v - v_{gl})^2}{2\sigma^2}\right] = Bg(u)g(v), \quad (1)$$

式中: A 为光斑像素点总能量; $B = A / (2\pi\sigma^2)$; σ 为高斯函数方差; (u_{gl}, v_{gl}) 为光斑灰度中心点位置坐标; $g(u)$ 和 $g(v)$ 为 u 方向和 v 方向的一维高斯分布函数。

对式(1)取对数,得到

$$\ln[g(u, v)] = \ln B - \frac{(u - u_{gl})^2}{2\sigma^2} - \frac{(v - v_{gl})^2}{2\sigma^2}, \quad (2)$$

令 $\ln C = \ln B - \frac{(v - v_{gl})^2}{2\sigma^2}$, 则

$$\ln[g(u, v)] = \ln C - \frac{(u - u_{gl})^2}{2\sigma^2}. \quad (3)$$

双目立体视觉校正后图像 u 方向上坐标相同的点的 C 值相同, 设 u 方向上三个点的坐标分别为 u_1, u_2, u_3 , 它们对应的灰度值分别为 $g(u_1), g(u_2), g(u_3)$, 则

$$\begin{cases} \ln[g(u_1)] = \ln C - \frac{(u_1 - u_{gl})^2}{2\sigma^2} \\ \ln[g(u_2)] = \ln C - \frac{(u_2 - u_{gl})^2}{2\sigma^2} \\ \ln[g(u_3)] = \ln C - \frac{(u_3 - u_{gl})^2}{2\sigma^2} \end{cases} \quad (4)$$

同理, v 方向可以得到与式(4)相似的方程组, 求解后得到左相机 LED 光源图像的光斑灰度中心 O_{gl} 的坐标值为

$$\begin{cases} u_{gl} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(u_3^2 - u_2^2) \ln[g(u_1)]}{(u_3 - u_2) \ln[g(u_1)]} + \frac{(u_1^2 - u_3^2) \ln[g(u_2)]}{(u_1 - u_3) \ln[g(u_2)]} + \frac{(u_2^2 - u_1^2) \ln[g(u_3)]}{(u_2 - u_1) \ln[g(u_3)]} \right\} \\ v_{gl} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(v_3^2 - v_2^2) \ln[g(v_1)]}{(v_3 - v_2) \ln[g(v_1)]} + \frac{(v_1^2 - v_3^2) \ln[g(v_2)]}{(v_1 - v_3) \ln[g(v_2)]} + \frac{(v_2^2 - v_1^2) \ln[g(v_3)]}{(v_2 - v_1) \ln[g(v_3)]} \right\}. \end{cases} \quad (5)$$

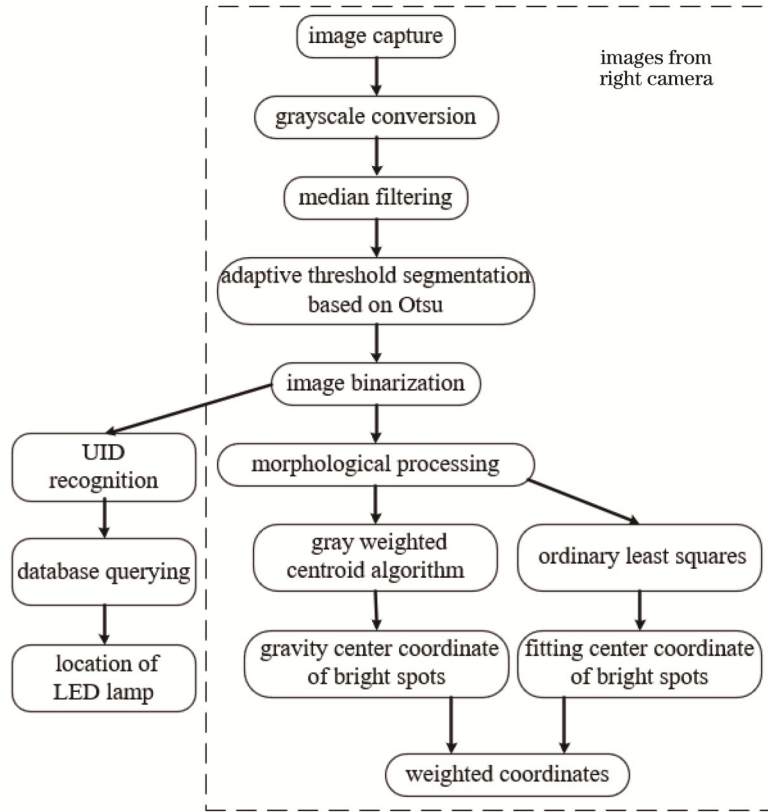


图 7 接收端图像处理流程

Fig. 7 Image processing flow of receiver

同样,可得到右相机 LED 光源图像的光斑灰度中心 O_{gr} 的坐标值。

3.1.2 基于最小二乘法的光斑中心提取

以左相机图像为例,设椭圆的参数方程为

$$A'u^2 + B'uv + C'v^2 + D'u + E'v + 1 = 0, \quad (6)$$

式中: A', B', C', D', E' 为所拟合椭圆的系数^[19]。设椭圆轮廓上第 i 个测量点为 $P_i(u_i, v_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 通过最小二乘法拟合这些轮廓点后目标函数为

$$F(A', B', C', D', E') = \sum_{i=1}^n (A'u^2 + B'uv + C'v^2 + D'u + E'v + 1)^2, \quad (7)$$

取极值使 F 最小,则

$$\frac{\partial F}{\partial A'} = \frac{\partial F}{\partial B'} = \frac{\partial F}{\partial C'} = \frac{\partial F}{\partial D'} = \frac{\partial F}{\partial E'} = 0, \quad (8)$$

即可求解出椭圆参数 A', B', C', D', E' 的值,得到拟合的椭圆方程,进而计算出左相机 LED 光源图像采用最小二乘法拟合后的光斑中心坐标 O_{el} 为

$$\begin{cases} u_{el} = \frac{2B'E' - C'D'}{4A'C' - (B')^2} \\ v_{el} = \frac{B'D' - 2A'E'}{4A'C' - (B')^2} \end{cases} \quad (9)$$

同理,可得到右相机 LED 光源图像采用最小二乘法拟合后的光斑中心 O_{er} 的坐标值。

为了提高光斑中心提取的稳定性和准确度,参考

图像处理轮廓度量概念^[16],采用圆度加权拟合法,以光斑圆度为定权因子,使用光斑灰度中心与基于最小二乘法的椭圆拟合中心的加权平均值作为光源的中心 (O_{ul}, O_{vl}) 和 (O_{ur}, O_{vr}), 得到

$$\begin{cases} O_{ul} = \alpha O_{gl}u + (1 - \alpha) O_{el}u \\ O_{vl} = \alpha O_{gl}v + (1 - \alpha) O_{el}v \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} O_{ur} = \alpha O_{gr}u + (1 - \alpha) O_{er}u \\ O_{vr} = \alpha O_{gr}v + (1 - \alpha) O_{er}v \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $\alpha = 4\pi S_C / L_C^2$ 为光斑轮廓的圆度, α 的取值范围为 $\alpha \in (0.4, 10.0)$, 其中 S_C 为光斑轮廓的面积, L_C 为轮廓的周长。

3.2 列车位置信息求解

以式(10)和式(11)所得的像素坐标系下的 LED 光源图像的光斑中心作为特征点,得到图像视差。采用基于单特征点的三角测量法得到列车与 LED 光源的相对位置,也就是 LED 光源在相机坐标系下的位置坐标。结合 LED 光源在世界坐标系中的空间位置信息进行多坐标系间的转换,求得接收端在世界坐标系中的位置信息,并将该信息作为列车定位结果。

左右相机对应的图像只在 u 轴上有差异,视差为 $d = |O_{ul} - O_{ur}|$, 相机坐标系下 LED 光源坐标 (x_l, y_l, z_l) 可以表示为

$$\begin{cases} x_L = -\frac{O_{ul}z_L}{f} \\ y_L = -\frac{O_{vl}z_L}{f} \\ z_L = \frac{fb}{d} \end{cases} \quad (12)$$

式中： f 为双目相机光学焦距； b 为双目 CMOS 视觉传感器基线长度。

由图 6 中双目立体视觉透视投影模型可知，LED 光源在世界坐标系下对应的坐标为 $L_w(X_L, Y_L, Z_L)$ ，在 VLC 通信过程中可得到该值。像素坐标系与世界坐标系之间的转换关系为

$$z_L \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{du} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dv} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中： du 和 dv 为单个像素在坐标轴方向上的尺寸； (u_0, v_0) 为左相机图像平面中心点像素坐标； R 和 T 分别为双目立体视觉相机的旋转矩阵和平移矩阵。

接收端(地铁列车)世界坐标 $T_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 的计算方法为

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} - R_x R_y R_z \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中： R_x 、 R_y 和 R_z 为双目立体视觉相机的旋转向量。

3.3 列车自主定位运动补偿

由式(14)得到的列车定位结果并不能真实地反映地铁列车的运行状态，当列车运行时，接收端图像会产生运动模糊，导致光斑中心坐标提取的精度降低，影响列车与 LED 光源之间的相对位置测算。另外，列车运行会造成接收端载体平台机械振动，使双目立体视觉系统角度偏移，导致列车自主定位结果产生误差。因此，针对这两种情况进行运动补偿。

3.3.1 运动模糊补偿

当列车以一定速度运行时，曝光时间内 LED 光源与列车之间会产生相对位移，拍摄的图像中同一个像素点被来自不同位置的光照射，并且运动过程中存在内部传感器噪声，导致接收端拍摄到条纹边界模糊的图像，影响列车自主定位精度^[20]。因此，需要对运动模糊带来的影响进行补偿。

设列车运行速度为 V ，则 LED 光源在图像中对应像素点的移动速度为

$$V_c = \frac{V \cos \psi}{W} f, \quad (15)$$

式中： W 为双目 CMOS 传感器与 LED 光源的横向距离； ψ 为双目 CMOS 传感器的安装角度，如图 8 所示。

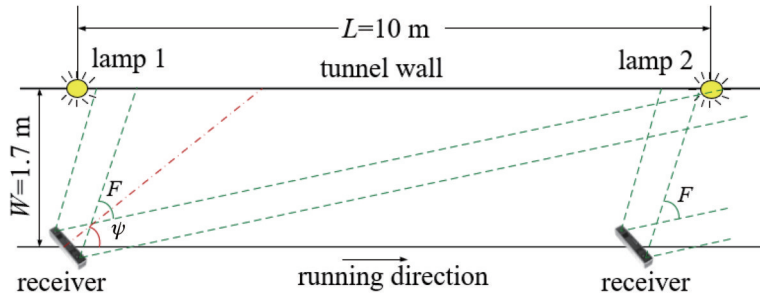


图 8 接收端安装角

Fig. 8 Mounting angle of receiver

为了确保双目 CMOS 传感器在定位单元内不同位置处均能摄取到 LED 光源的光信号，计算其最小安装角度为

$$\psi = \arctan(L/W) - \frac{F}{2}, \quad (16)$$

式中： L 为定位单元长度； F 为双目 CMOS 传感器视场角。

曝光时间 t 内 LED 光源对应像素点的像移量为

$$\Delta I = V_c t. \quad (17)$$

模糊图像可以表示为

$$G_B = K * G_S + N, \quad (18)$$

式中： K 为模糊核矩阵； $*$ 为卷积符号； G_S 为接收端摄取的清晰图像； N 为加性噪声。模糊图像像素^[21]可以表示为

$$g_B(u, v) = \iint_{D(\cdot)} g(u + \Delta u, v + \Delta v) d\Delta u d\Delta v + n(u, v), \quad (19)$$

式中： $g(\cdot)$ 为 LED 光源像素值； $D(\cdot)$ 为接收端曝光时间内图像像素空间位置 (u, v) 的邻域； $(\Delta u, \Delta v)$ 为该邻域内的点。

模糊图像中 LED 光源图像区域灰度分布的二维高斯分布函数可以表示为

$$G_B(u, v) = \frac{1}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp \left\{ -\frac{\left[u - \left(u_0 + \frac{\Delta I_y}{\delta} \right) \right]^2}{2\sigma^2} - \frac{\left[v - \left(v_0 + \frac{\Delta I_z}{\delta} \right) \right]^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (20)$$

式中: ΔI_y 和 ΔI_z 分别为 LED 光源区域在 y 方向和 z 方向的像移量; δ 为像素点的角分辨率。

采用维纳滤波可以有效消除运动模糊, 对图像去

模糊处理后进行信息提取, 进而实现定位。运动模糊图像和清晰图像如图 9 所示。

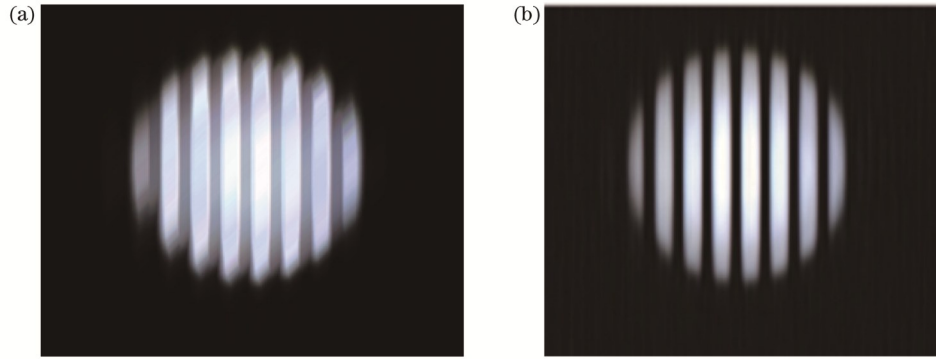


图 9 运动模糊光斑图像和滤波后的图像。(a) 运动模糊图像; (b) 维纳滤波后的图像

Fig. 9 Image of bright spot with motion blur and image after filtering. (a) Image of bright spot with motion blur; (b) image after Wiener filtering

3.3.2 机械振动补偿

考虑实际情况, 地铁列车运行带来的载体平台机械振动会使双目立体视觉系统发生角度偏移, 影响 LED 光源与双目立体视觉系统的三维坐标关系^[22]。为了减轻双目立体视觉系统角度偏移造成的定位误差, 采用 IMU 实时测量双目立体视觉系统的姿态角, 得到接收端在 X 、 Y 、 Z 三个方向的角度偏移, 补偿后可实现定位^[23]。最终, 列车动态定位结果为

$$\begin{cases} X_{wT} = X_w + V_x t + \sum_{i=1}^n A_{x_{f_i}} \cos(2\pi f_i t) + G_{X_w} \\ Y_{wT} = Y_w + V_y t + \sum_{i=1}^n A_{y_{f_i}} \cos(2\pi f_i t) + G_{Y_w} \\ Z_{wT} = Z_w + V_z t + \sum_{i=1}^n A_{z_{f_i}} \cos(2\pi f_i t) + G_{Z_w} \end{cases} \quad (21)$$

式中: V_x 、 V_y 、 V_z 分别为列车在 X 、 Y 、 Z 三个方向的速度分量; $\sum_{i=1}^n A_{x_{f_i}} \cos(2\pi f_i t)$ 、 $\sum_{i=1}^n A_{y_{f_i}} \cos(2\pi f_i t)$ 、 $\sum_{i=1}^n A_{z_{f_i}} \cos(2\pi f_i t)$ 为列车 X 、 Y 、 Z 方向机械振动带来的抖动变量; $A_{x_{f_i}}$ 、 $A_{y_{f_i}}$ 、 $A_{z_{f_i}}$ 为频率为 f_i 的正弦波在 X 、 Y 、 Z 方向的幅度, 机械振动可以表示为不同幅度的低频正弦函数的叠加; G_{X_w} 、 G_{Y_w} 、 G_{Z_w} 分别为路面不平整导致的 X 、 Y 、 Z 方向的变量, 可近似为均值为零的高斯分布。

4 实验结果分析

为了验证所提方法的可行性和有效性, 依托甘肃

省人工智能与图形图像处理工程研究中心的实验平台, 结合 GB 50157—2013 规范的参数和成都地铁 1 号线的线路数据与设备信息, 构建列车定位实验场景, 分析静态定位实验结果与动态定位模拟实验结果, 以验证列车的自主定位精度^[24]。

4.1 实验环境

成都地铁 1 号线的隧道为圆形, 正线和配线隧道的轨道结构高度为 740 mm。采用 B1 型车辆, 车辆长 118020 mm、宽 2800 mm、高 3820 mm, 地板面与轨顶面的距离为 1100 mm。旅行速度为 35~40 km/h, 最高运行速度为 80 km/h, 设计速度为 120 km/h。此外, LED 光源间距为 10 m, LED 光源与接收端的垂直高度差为 $H=1.5$ m, 横向距离为 $W=1.7$ m。在列车动态定位模拟实验中, 参考地铁设计标准中 B1 型地铁车辆参数, 双目 CMOS 传感器角度变化范围为 $-5.0^\circ \sim 7.5^\circ$, IMU 采用 ADIS 16488。

以两个 LED 光源之间的空间为一个列车定位单元, 列车接收距离最近的 LED 光源信息, 直至切换至下一个列车定位单元。搭建大小为 $10.0 \text{ m} \times 1.7 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的列车自主定位实验场景, 设 LED 光源坐标为 $(0, 10.0, 0)$, 双目立体视觉系统的初始坐标为 $(1.7, 0, 1.5)$, 验证单线圆形隧道(不含走行道)平直轨道的列车自主定位。融合 VLC 和双目立体视觉的列车自主定位实验平台如图 10 所示, 仿真参数如表 1 所示。

在列车动态定位模拟实验过程中, 在每个定位测

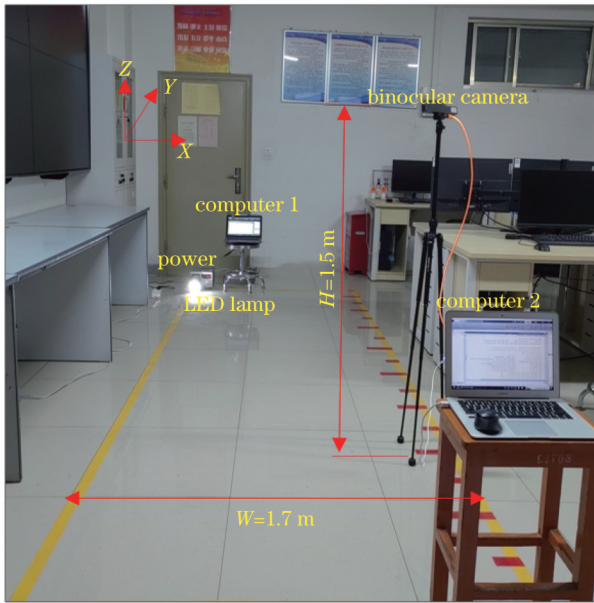


图 10 融合 VLC 和双目立体视觉的列车自主定位实验平台
Fig. 10 Experimental platform of autonomous train positioning using VLC and binocular stereo vision

试点依次放置双目 CMOS 传感器,记录接收端的实际坐标和实际角度。根据双目 CMOS 传感器在列车不同运行速度下对应的像移量,利用 MATLAB 软件仿真得到不同速度对应的运动模糊图像,采用维纳滤波消除运动模糊得到清晰图像后,根据所提列车定位方法实现初始定位。以不同幅度的低频正弦函数的叠加

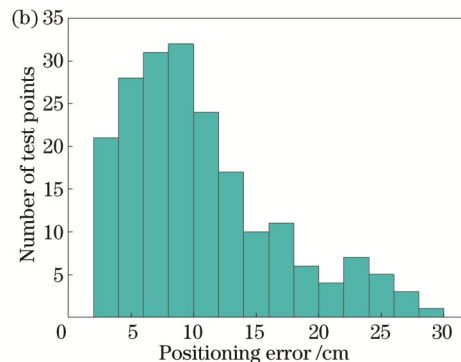
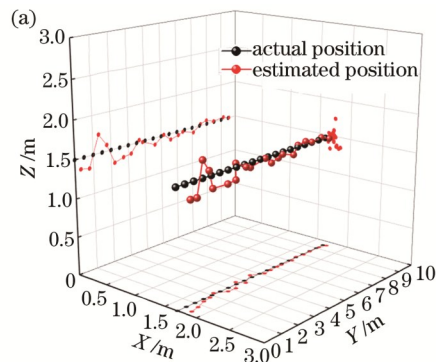


图 11 列车静态定位。(a)列车定位结果;(b)定位误差分布

Fig. 11 Static train positioning. (a) Train positioning result; (b) positioning error distribution

从图 11 可以看出, X-Y 平面中随着接收端坐标趋近 (1.7, 10.0, 1.5), 即发送端与接收端之间距离缩短, 收发端之间的估计距离与实际距离越接近, 定位结果越精确。在 200 个测试结果中, 最大定位误差在 (1.7, 0, 1.5) 点处, 大小为 29.73 cm, 最小定位误差在 (1.7, 10.0, 1.5) 点处, 大小为 2.68 cm, 平均定位误差为 10.48 cm。由图 11(b) 可以看出, 90% 的静态定位误差都在 20 cm 以内。所提方法的静态定位精度可以达到厘米级, 实验得到的列车位置信息基本能够反映列车的实际位置, 位置分辨率和最大定位误差远

| Parameter | Value |
|---|--------------------|
| Focal length /mm | 3.9 |
| Base line /mm | 120 |
| Pixel size /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$) | 3.75×3.75 |
| Camera resolution /($\text{pixel} \times \text{pixel}$) | 2560×720 |
| Depth distance /m | 0.49–10.00 |
| Power of LED lamps /W | 21.0 |
| Field angle of LED lamp /($^\circ$) | 60.0 |
| Horizontal field angle of camera /($^\circ$) | 64 |
| Vertical field angle of camera /($^\circ$) | 38 |
| Camera placement angle /($^\circ$) | 49 |
| Interval between LED lamps /m | 10 |
| Tunnel radius /m | 3 |
| Height of train /m | 3.8 |
| Width of train /m | 2.8 |

表示机械振动, 采用 IMU 补偿, 得到列车的动态定位结果。

4.2 列车自主定位实验结果分析

4.2.1 列车静态定位实验结果分析

为了分析所提方法的静态定位精度, 在 Y 方向上以 0.5 m 为步长, 以 (1.7, 0, 1.5) 至 (1.7, 10.0, 1.5) 之间的 20 个测试点分别进行 10 次定位测试, 且列车速度为 0 km/h, 列车静态定位实验结果如图 11 所示。

小于 IEEE 1474.1—2004 标准中规定的 6.25 m 和 ± 10 m^[25]。

将所提定位方法与基于 VLC 和单目视觉的列车定位方法进行比较, 定位结果对比如图 12 所示。可以看出: 两种方法在列车接近 LED 光源位置时, 定位结果都趋近列车实际位置; 当列车在定位单元边缘且距离 LED 光源较远时, 基于 VLC 和单目视觉的定位方法最大定位误差可达到 35.56 cm, 而所提定位方法最大定位误差仅为 29.73 cm (定位结果与实际位置偏离更小)。

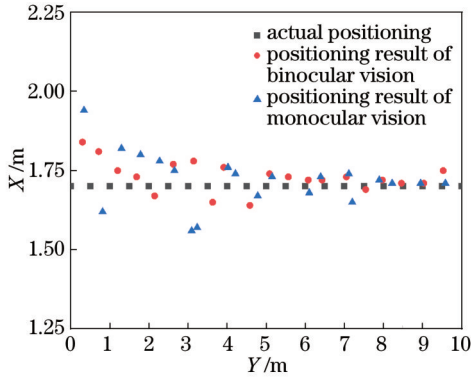


图 12 定位结果对比

Fig. 12 Comparison of positioning results

4.2.2 列车动态定位模拟实验结果分析

为了验证所提方法的动态定位精度,在 Y 方向上

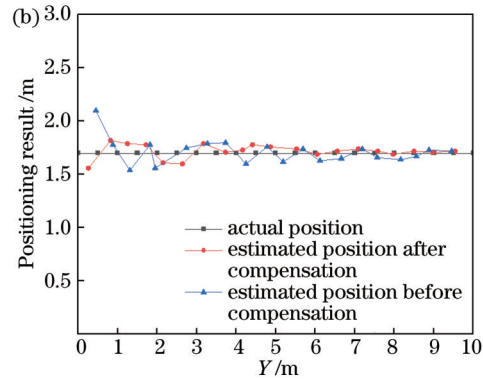
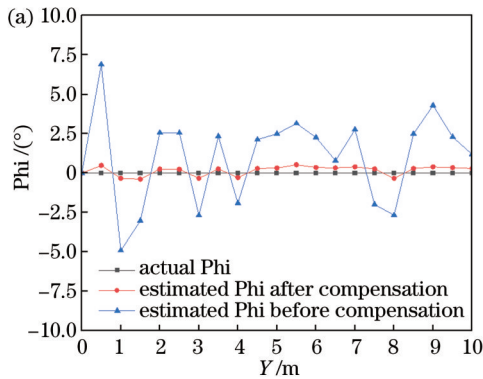


图 13 当列车速度为 20 km/h 时 IMU 补偿前后定位情况对比。(a) 航向角对比; (b) 定位结果对比

Fig. 13 Comparison of train positioning at speed of 20 km/h before and after compensation with IMU. (a) Comparison of Phi; (b) comparison of positioning results

2) 列车动态定位结果分析

不同速度下的列车动态定位结果如图 14 所示。当列车速度为 20、40、60、80、100 km/h 时,最大定位误差分别为 32.09、33.05、34.25、34.75、36.11 cm,平均定位误差分别为 11.07、14.21、15.33、16.52、17.68 cm,最大定位误差符合 IEEE 1474.1—2021 标准。可以看出,列车的运行速度对定位结果的准确性

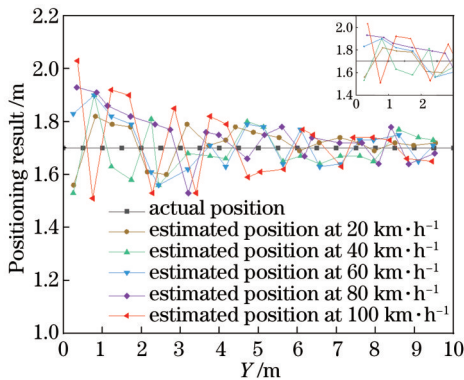


图 14 不同速度下的列车动态定位结果

Fig. 14 Results of dynamic train positioning at different speeds

以 0.5 m 为步长,在 20 个测试点位置分别进行 10 次定位测试,模拟列车分别以 20、40、60、80、100 km/h 速度运行时的图像运动模糊和列车机械抖动。

1) 运动补偿结果分析

为了反映 IMU 的机械振动补偿对列车运行过程中定位结果的影响,以 20 km/h 速度下的列车动态定位为例,对比 IMU 补偿前后的双目立体视觉系统在 Y 方向的角度偏移和定位结果,如图 13 所示。静止状态初始航向角(Phi)为 0°,补偿之前列车双目立体视觉系统的航向角误差范围为 -5.0°~7.5°,经过 IMU 的运动补偿之后的航向角最大误差小于 0.5°,偏移较小,能够较好地校正航向角,如图 13(a) 所示。在图 13(b) 中,采用 IMU 进行补偿前最大定位误差为 35.24 cm,经过 IMU 运动补偿后最大定位误差为 32.09 cm,表明所提定位方法可以有效提高列车定位精度。

有一定影响,列车运行速度越慢,定位结果越精确,但不同速度下的定位结果均能够较好地趋近列车实际位置。

通过 MATLAB 软件获得程序计算列车位置的时间,加上双目 CMOS 传感器的曝光时间后可得到基于 VLC 与双目立体视觉的列车定位时间,不同速度下列车最大定位时间和平均定位时间如表 2 所示。列车在不同速度下运行时动态定位最大定位时间远小于 IEEE 1474.1—2004 标准对地面设备到车载设备信息传输延时的规定(2 s)^[25]。

表 2 定位时间
Table 2 Positioning time

| Train speed / (km·h ⁻¹) | Minimum time /ms | Maximum time /ms | Average time /ms |
|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 20 | 48.12 | 50.53 | 49.32 |
| 40 | 48.26 | 50.32 | 49.46 |
| 60 | 49.21 | 50.86 | 49.73 |
| 80 | 49.32 | 51.27 | 50.04 |
| 100 | 49.48 | 51.32 | 50.26 |

采用 VLC 和双目立体视觉的列车动态定位误差的整体分析如图 15 所示。在图 15(a)中,以列车在 20 km/h 速度下运行时定位误差分布为例,定位误差集中在 3.8~12.3 cm 区间内,小于 4% 的定位误差达到 30 cm 以上。从图 15(b)所示的定位误差的集中趋势

可以看出,列车在运行速度为 20、40、60、80、100 km/h 时,75% 的动态定位误差分别小于 18.0、19.0、22.0、23.0、23.5 cm,整体的定位精度稳定性较好,表明所提方法可以支撑列车在隧道环境下的自主定位。

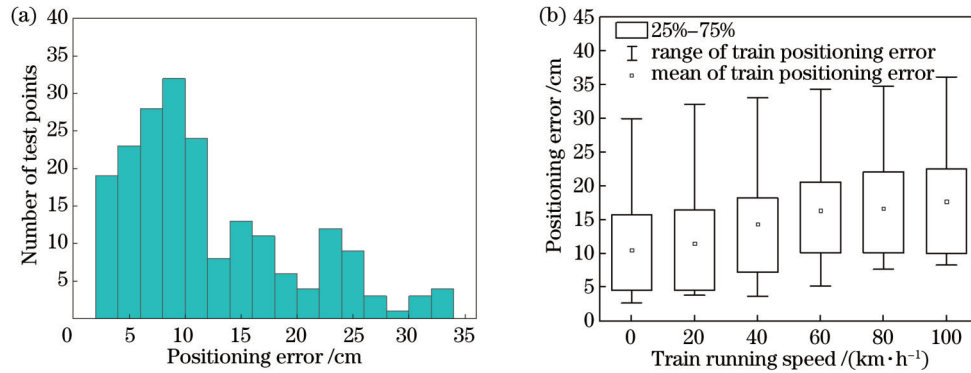


图 15 不同速度下的列车定位误差。(a)速度为 20 km/h 时列车定位误差分布;(b)列车定位误差范围

Fig. 15 Train positioning errors at different speeds. (a) Distribution of train positioning errors at speed of 20 km/h; (b) range of train positioning errors

5 结 论

针对隧道内面向车车通信的列车自主定位需求,提出了融合 VLC 与双目立体视觉的地铁列车自主定位方法。所提方法将隧道内照明 LED 光源作为 VLC 的发送端,双目立体视觉系统作为 VLC 的接收端,通过建立 LED 光源在世界坐标系和像素坐标系中的位置对应关系确定列车的实际位置。根据 GB 50157—2013 规范中的参数和成都地铁 1 号线的线路数据与设备信息,搭建列车自主定位实验平台以验证列车定位方法的可行性和有效性,实现了列车在不同速度下运行的自主定位。当列车运行速度为 100 km/h 时,最大定位误差为 36.11 cm,最大定位时间为 51.32 ms。从当前 LED 光源切换至下一个 LED 光源期间,所提方案可以完成多次定位过程,有效提高了列车定位的实时性和精度,满足 IEEE 1474.1—2004 标准对于 CBTC 系统定位的技术要求。所提方法可为面向车车通信的 CBTC 系统提供一种新的列车定位选择。

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] 李强, 陈子健. 基于车车通信的列控系统后备模式研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(11): 3407-3416.
Li Q, Chen Z J. Research on backup mode of train control system based on train-to-train communication[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(11): 3407-3416.
- [3] Hamid H A, Nicholson G L, Roberts C. Impact of train positioning inaccuracies on railway traffic management systems: framework development and impacts on TMS functions[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(6): 534-544.
- [4] 李广云, 孙森震, 王力, 等. 可见光通信室内定位技术进展与应用[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 909-922.
Li G Y, Sun S Z, Wang L, et al. Research and application of indoor visible light communication positioning technology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 909-922.
- [5] 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.
- [6] 徐世武, 吴怡, 王徐芳. 基于粒子群优化压缩感知的可见光定位算法[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0306004.
Xu S W, Wu Y, Wang X F. Visible light positioning algorithm based on particle swarm optimization compressed sensing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0306004.
- [7] 张雁鹏, 孟楠, 胥亚丽, 等. 基于 Newton-UKF 的可见光通信列车定位优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 1-7.
Zhang Y P, Meng N, Xu Y L, et al. Train positioning optimization with Newton-UKF algorithm using visible light communication[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(3): 1-7.
- [8] 管扬, 孙德栋, 殷树刚, 等. 基于成像通信的高精度可见光室内定位方法[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206001.
Guan Y, Sun D D, Yin S G, et al. High precision visible light indoor positioning based on image communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1206001.
- [9] He J, Zhou B. Vehicle positioning scheme based on visible light communication using a CMOS camera[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27278-27290.
- [10] Li H P, Huang H B, Xu Y Z, et al. A fast and high-accuracy real-time visible light positioning system based on single LED lamp with a beacon[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(6): 7906512.
- [11] 张雁鹏, 朱东亚, 马军民, 等. 基于单目视觉和可见光成像通信的地铁列车定位[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 1606001.
Zhang Y P, Zhu D Y, Ma J M, et al. Subway train positioning based on monocular vision and optical camera communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1606001.

- [12] 樊庆文, 李海博, 裴宏亮, 等. 一种基于数字图像的空间测距算法及仪器研发[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 201-205.
Fan Q W, Li H B, Pei H L, et al. Instrument development and distance measurement algorithm based on digital image[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(3): 201-205.
- [13] Wang Y, Wang X J. On-line three-dimensional coordinate measurement of dynamic binocular stereo vision based on rotating camera in large FOV[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 4986-5005.
- [14] 黄平, 曹镇, 王欢. 基于环形特征匹配的双目视觉里程计[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1515002.
Huang P, Cao Z, Wang H. Stereo visual odometry based on ring feature matching[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1515002.
- [15] Liu Y F, Wang H, Dong C Y, et al. A car-following data collecting method based on binocular stereo vision[J]. IEEE Access, 2020, 8: 25350-25363.
- [16] 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.
- [17] 赵婧鑫, 周富强. 小尺寸光斑中心的高精度定位算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2690-2693.
Zhao J X, Zhou F Q. High-precision center location algorithm of small-scale focal spot[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8): 2690-2693.
- [18] 王星星, 唐新明, 祝小勇, 等. 高分七号卫星足印光斑质心提取方法与稳定性监测[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2428001.
Wang X X, Tang X M, Zhu X Y, et al. Centroid extraction method of Gaofen-7 satellite footprint spots and stability monitoring[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2428001.
- [19] 潘登, 李艳丽, 高东, 等. 基于椭圆拟合的多光斑/重叠光斑中心提取方法[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1410001.
Pan D, Li Y L, Gao D, et al. Center extraction method of multiple and overlapping faculae based on ellipse fitting[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1410001.
- [20] Trong H D, Myungsik Y. Visible light communication based vehicle positioning using LED street light and rolling shutter CMOS sensors[J]. Optics Communications, 2018, 407: 112-126.
- [21] 潘迪, 周琦, 刘轩, 等. 高动态条件下星斑模拟与星点提取方法[J]. 光子学报, 2022, 51(3): 0304002.
Pan D, Zhou Q, Liu X, et al. Modeling and detection of star spot in high dynamic condition[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3): 0304002.
- [22] Lin P X, Hu X B, Ruan Y K, et al. Real-time visible light positioning supporting fast moving speed[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 14503-14510.
- [23] 上官伟, 谢朝曦, 姜维. 基于IMU标定补偿的列车组合定位优化方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(2): 57-64.
Shangguan W, Xie C X, Jiang W. Optimization method for integrated train positioning accuracy based on IMU calibration compensation[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(2): 57-64.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [25] IEEE. IEEE standard for Communications-Based Train Control (CBTC) performance and functional requirements: IEEE Std 1474.1-2004[S]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004.

Autonomous Train Positioning for Metros Using Visible Light Communication and Binocular Stereo Vision

Zhang Yanpeng^{1,2*}, Meng Nan^{1,2}, Xiao Xia³, Zhu Xiaoqi^{1,2}

¹School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

²Gansu Provincial Engineering Research Center for Artificial Intelligence and Graphics & Image Processing, Lanzhou 730070, Gansu, China;

³School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Objective The communications-based train control (CBTC) systems play a vital role in ensuring the safe and effective operation of urban mass transit, which can further improve headway and reduce the number of wayside equipment. The emergence of vehicle-to-vehicle(V2V) communications in railway signaling industry has made it crucial that metros ensure safe train separation with a moving block, where a train determines its location, direction, and speed by itself. Therefore, identifying the accurate location of trains becomes a tremendous challenge for CBTC using V2V communications. To determine its location on the rails, many devices including tachometers, accelerometers, transponders (or tags), radar, wireless local area network (WLAN), and long-term evolution (LTE) are utilized by a train. There are still some intrinsic drawbacks to train positioning in existing CBTC systems, which are characterized by the low standard of precision, discontinuity, and vulnerability to jamming attacks in wireless networks. In recent years, however, the technology of visible light communication (VLC) has been gaining increasing attention as it has a wide range of application scenarios such as indoor localization, traffic lights management, and sensing, which can provide both illumination and data communications to address the urgent problems of spectrum crunch, wireless jamming and so on. Moreover, the VLC

technology has great potential and can also be applied to determine the train location for new CBTC systems via light-emitting diode (LED) lamps, which are usually installed on the tunnel walls of metros. In the present study, the needs of train localization through the combination of VLC and binocular stereo vision are satisfied to achieve autonomous train positioning, particularly in tunnels. Hopefully, the basic strategies and findings obtained can be conducive to autonomous train positioning for CBTC systems adopting V2V communications.

Methods In the present study, LED lamps installed on the tunnel walls of metros are used as the transmitter of VLC, while the binocular stereo vision system fixed on the top of a cab serves as the receiver of VLC. In this way, the autonomous train positioning in CBTC systems is realized. Firstly, the receiver captures the images of LED lamps and transmits them to the on-board equipment. In light of differences in frequencies from highly flickering LED lamps, a running train can acquire the unique identification (UID) of the corresponding LED lamp in real time and the location of the lamp can be precisely pinpointed in world coordinate system through on-board database. Then, the center coordinates of LED bright spots on the image of LED lamps can be extracted based on the gray weighted centroid algorithm and ordinary least squares as a single feature point for stereo matching to calculate the relative distance between the train and the LED lamp. Next, in terms of the principle of binocular stereo vision, the initial train location can be determined through coordinate conversions. Finally, to obtain the actual conditions of train running, the Wiener filter and inertial measurement unit (IMU) have been adopted to compensate for the train positioning error caused by motion blur of images and mechanical vibration from the receiver respectively, and realize autonomous train positioning at different speeds. In addition, an experimental platform of VLC and binocular stereo vision for autonomous train positioning are established and the experimental results of static and dynamic train positioning are analyzed by MATLAB. The results are combined with the real line data and equipment information in Chengdu Metro Line 1 to demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Results and Discussions A series of experiments on static and dynamic train positioning within a range of 20 test points are carried out as well as train running direction. For static train positioning, 90% of train location errors can be controlled within 20 cm and the maximum error is 29.73 cm (Fig. 11). The proposed method shows less deviation from the actual train location in terms of the train positioning results compared with the train positioning method based on VLC and monocular vision, when a train is running at the edge of a positioning unit and far from the LED lamp (Fig. 12). As to dynamic train positioning, the course angle error of the binocular stereo vision system is reduced from 7.5° to 0.5° after the compensation of motion blur using IMU when a train is running at the speed of 20 km/h, and the maximum train location error is decreased from 35.24 cm to 32.09 cm (Fig. 13). Moreover, the maximum train location errors are 32.09 cm, 33.05 cm, 34.25 cm, 34.75 cm and 36.11 cm at the speed of 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h and 100 km/h, respectively (Fig. 14). In addition, 75% of the dynamic train positioning errors are less than 18 cm, 19 cm, 22 cm, 23 cm and 23.5 cm, respectively (Fig. 15), and the maximum time of train positioning is 51.32 ms (Table 2). Overall, the results of static and dynamic train positioning can meet the requirements of the IEEE 1474.1—2004 standard for train positioning.

Conclusions In the present study, a novel kind of train positioning method, combining VLC and binocular stereo vision, is specifically provided to achieve the autonomous train positioning of CBTC systems in metro tunnels, which can be taken as a supplement to traditional train positioning methods. According to the above empirical study, the maximum errors of static train positioning and dynamic train positioning are 29.73 cm and 36.11 cm and the maximum time of train positioning is 51.32 ms, demonstrating the real train location ultimately. Meanwhile, the standard of train positioning precision has dropped slowly when a train is gradually picking up speed. Additionally, the precision of train positioning can reach the centimeter level in the proposed method, and the maximum error and the maximum time of train positioning are much smaller than ± 10 m and 2 s, respectively, which are in line with the strict IEEE 1474.1—2004 standard. This study shows that the proposed method can satisfy the needs of autonomous train positioning in tunnels and provide some alternative approaches to train positioning of CBTC systems with V2V communications.

Key words optical communications; visible light communication; train positioning; binocular stereo vision; vehicle-to-vehicle communications