文章编号:1671-251X(2019)12-0086-05　　DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17409

煤矿井下精确定位系统研究

陈伟[1,2,3]

(1.煤炭科学技术研究院有限公司,北京　100013;
2.煤矿应急避险技术装备工程研究中心,北京　100013;
3.北京市煤矿安全工程技术研究中心,北京　100013)

扫码移动阅读

摘要:针对现有基于 RFID,ZigBee,WiFi 等技术的煤矿井下人员定位系统定位精度较低的问题,提出了融合可见光通信和惯性导航系统的煤矿井下精确定位系统。该系统以煤矿井下 LED 照明灯作为 LED 可见光定位基站,利用智能信息矿灯内置 CMOS 摄像头接收可见光信号进行定位,利用智能信息矿灯内置加速度传感器和陀螺仪数据进行时间积分得到井下人员运动轨迹和方向,并通过智能信息矿灯识别 LED 可见光定位基站的 ID 编码信息重新定位来修正惯性导航数据,从而实现精确定位。在煤矿井下布置 8 个 LED 可见光定位基站,通过 5 台智能信息矿灯以正常速度移动来测试系统定位精度,结果表明系统定位误差小于 1 m,满足煤矿井下人员定位精度要求。

关键词:井下人员定位;精确定位;可见光通信;惯性导航;LED 可见光定位基站;智能信息矿灯
中图分类号:TD67　　文献标志码:A

Research on precise positioning system of coal mine underground

CHEN Wei[1,2,3]

(1.China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
2.Coal Mine Emergency Rescue Technology Equipment Research Center, Beijing 100013, China;
3.Beijing Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract: For low position precision of existing personnel positioning system of coal mine underground based on RFID, ZigBee, WiFi and so on, a precise positioning system of coal mine underground was proposed which combined visible light communication with inertial navigation system. In the system, underground LED lighting lamp is taken as LED visible light positioning base-station. Visible light signal is received by CMOS camera in intelligent information mining-lamp for positioning. Data of acceleration sensor and gyro in intelligent information mining-lamp is timely integrated to get moving track and direction of underground personnel. Data of inertial navigation system could be corrected through intelligent information mining-lamp identifying ID coding information of LED visible light positioning base-station for anew positioning, so as to realize precise positioning. Eight LED visible light positioning base-stations are arranged in coal mine underground. Positioning precision of the system is tested through five intelligent information mining-lamps moving at normal speed. The results show that positioning error of the system is less than 1 m, which meets precision requirements of personnel positioning in coal mine underground.

Key words: underground personnel positioning; precise positioning; visible light communication; inertial navigation; LED visible light positioning base-station; intelligent information mining-lamp

收稿日期:2019-06-02;**修回日期**:2019-11-29;**责任编辑**:李明。
基金项目:煤炭科学技术研究院技术创新基金资助项目(2017CX08,2018CX07);北京市科委计划项目(Z171100002317020)。
作者简介:陈伟(1983－),男,广西贵港人,助理研究员,硕士,现主要从事煤矿安全监测与通信等方面的研究工作,E-mail:chenwei@ccrise.cn。
引用格式:陈伟.煤矿井下精确定位系统研究[J].工矿自动化,2019,45(12):86-90.
CHEN Wei. Research on precise positioning system of coal mine underground[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(12): 86-90.

0　引言

目前，煤矿井下人员定位系统主要基于 RFID，ZigBee，WiFi 等无线通信技术[1]。RFID 最早应用于井下人员定位系统，但因无线传输距离短、极易受干扰等逐渐被其他技术取代；ZigBee 技术功耗低，发射距离较远[2]，目前在煤矿井下人员定位系统中得到广泛应用，但定位误差较大（普遍大于 2 m），且常出现定位距离不稳定、跳跃等情况；WiFi 人员定位系统存在标签功耗高、WiFi 热点采集算法复杂、同频干扰严重、非标协议开发、定位精度不高等问题。

针对上述问题，本文提出一种基于可见光通信（Visible Light Communication，VLC）[3-4]与惯性导航系统（Inertial Navigation System，INS）相结合的煤矿井下精确定位系统。该系统通过 LED 可见光定位基站和智能信息矿灯实现定位，利用 INS 技术得到井下人员运动轨迹和方向，可有效提高井下人员定位精度。

1　系统定位技术

1.1　VLC 技术

VLC 是一种以 LED 发出的可见光为信息载体，高速调制 LED 光源以实现信息传输的通信技术，兼顾照明与通信，不产生电磁辐射，也免受其干扰[5-7]。IEEE 802.15.7 明确了 VLC 规范和标准要求。

VLC 为煤矿井下人员定位系统设计提供了一种新的解决方案[8]。利用煤矿井下 LED 循环发出的 ID 编码信息，每个 LED 光源环境可形成一个较为精确的定位网络，通过 LED 可见光载体提供的信息即可确定所处的区间位置，实现井下定位。

1.2　INS 技术

INS 是一种以牛顿力学定律为基础，完全依靠速度传感器、角速度传感器等硬件，不依赖外部导航信息的自主式导航技术[9]，适用于煤矿井下相对封闭的工作环境。

智能信息矿灯为煤矿井下精确定位系统的终端设备，其获取内置加速度传感器和陀螺仪在惯性参考坐标系中测量的加速度和姿态角并对数据进行时间积分[10]，之后将数据变换到导航坐标系中，即可得到智能信息矿灯在导航坐标系中的速度、姿态、偏移角、位置等信息。因 INS 对采集数据进行积分，使得传感器误差累计，导致定位精度较差。智能信息矿灯通过识别 LED 可见光定位基站的 ID 编码信息重新定位，校正 INS 数据，修正累计误差对 INS 定位精度的影响。

2　系统定位算法

2.1　VLC 解调算法

智能信息矿灯的摄像头采用 YUV 格式提取数据，实现 VLC 解调。YUV 是视频处理中一种颜色编码方法，其中“Y”表示明亮度（也称灰度），“UV”表示色度，用来描述像素色彩及饱和度[11]。

摄像头每拍摄到 1 帧明暗条纹即进行 YUV 格式数据提取，同时对可见光灰度信息进行比较。由于智能信息矿灯摄像头获取的是二维图像，可见光在二维空间内像素点分布不均匀，采集的灰度亦不同，无法采用确定的门限判决灰度信息为“1”或“0”，需采用多项式拟合出一个变化的判决门限，并根据拟合的判决门限建立直角坐标系，解调出“1”和“0”。

在直角坐标系中给定数据 $A(x_i, y_i)$，$i=1, 2, \cdots, N$，N 为像素点个数，x_i 为第 i 个像素点，y_i 为第 i 个像素点灰度。根据该数据的集合可得到近似曲线：

$$Y_i = P(x_i) \tag{1}$$

所有数据点不要求在该近似曲线上，但要求这些数据点与该曲线间具有最小偏差。$A(x_i, y_i)$与近似曲线的偏差为

$$\varepsilon_i = P(x_i) - y_i \tag{2}$$

拟合出多样本数据，使偏差平方和最小，得到最小二乘拟合定义式（式(3)），从而解调可见光图像数据。

$$\min \sum_{i=1}^{N} \varepsilon_i = \sum_{i=1}^{N} [P(x_i) - y_i]^2 \tag{3}$$

式中 $P(x_i)$为第 i 个像素点灰度拟合值。

2.2　终端定位算法

智能信息矿灯采用捷联式 INS 技术[12]，通过加速度传感器测量井下人员移动速度、陀螺仪测量人员姿态角，对采集数据进行校准后得到人员姿态、速度等信息。根据导航坐标系（n 系）数据与智能信息矿灯加速度传感器测量值，计算出人员移动速度：

$$\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{n}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}} \boldsymbol{f}^{\mathrm{b}} - (2\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{ie}}^{\mathrm{n}} + \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{en}}^{\mathrm{n}}) \boldsymbol{V}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{n}} + \boldsymbol{g} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}$ 为方向余弦矩阵；$\boldsymbol{f}^{\mathrm{b}}$ 为加速度传感器测得的比力向量；$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{ie}}^{\mathrm{n}}$ 为地球自转角速度，$\omega_{\mathrm{ie}}^{\mathrm{n}} = 7.292\,115\,06 \times 10^{-5}$ rad/s；$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{en}}^{\mathrm{n}}$为 n 系对于地心惯性坐标系（e 系）的旋转角速度；$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度。

方向余弦矩阵为

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\theta & \sin\varphi\cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\varphi\sin\theta\sin\gamma - \sin\varphi\cos\gamma & \sin\varphi\sin\theta\sin\gamma + \cos\varphi\cos\gamma & \sin\theta\cos\gamma \\ \cos\varphi\sin\theta\sin\gamma + \sin\varphi\cos\gamma & \sin\varphi\sin\theta\sin\gamma - \cos\varphi\sin\gamma & \sin\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中：φ 为滚转角；θ 为俯仰角；γ 为偏航角。

智能信息矿灯坐标系（b 系）相对 n 系的角速度为

$$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{nb}}^{\mathrm{b}}=\left[\omega_{\mathrm{nb}x}^{\mathrm{b}} \quad \omega_{\mathrm{nb}y}^{\mathrm{b}} \quad \omega_{\mathrm{nb}z}^{\mathrm{b}}\right]^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}1 & 0 & -\sin\theta\\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma\cos\theta\\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma\cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\gamma}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\varphi}\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中 $\omega_{\mathrm{nb}x}^{\mathrm{b}}$，$\omega_{\mathrm{nb}y}^{\mathrm{b}}$，$\omega_{\mathrm{nb}z}^{\mathrm{b}}$ 为 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{nb}}^{\mathrm{b}}$ 三轴分量，由陀螺仪测得。

由式(6)可得

$$\begin{bmatrix}\dot{\gamma}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\varphi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & -\sin\theta\\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma\cos\theta\\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma\cos\theta\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\omega_{\mathrm{nb}x}^{\mathrm{b}}\\ \omega_{\mathrm{nb}y}^{\mathrm{b}}\\ \omega_{\mathrm{nb}z}^{\mathrm{b}}\end{bmatrix} \tag{7}$$

求解式(7)即可得到智能信息矿灯姿态角 φ，θ，γ。

智能信息矿灯采集加速度传感器与陀螺仪数据，经校准后得到运动速度与姿态角。根据姿态角计算偏航角（即运动方向），根据运动速度计算某时刻井下人员到 LED 可见光定位基站的距离，从而实现精确定位。

$$\boldsymbol{L}=\sum_{j}\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{n}}(T_{j+1}-T_{j}) \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{L}$ 为定位距离计算值；T_j 为智能信息矿灯相对 LED 可见光定位基站运动到某空间点的相对时间点（在 LED 光源下，智能信息矿灯每识别到 ID 编码信息及 LED 光源中心相对范围 1 m 内，$j=0$，$T_0=0$）。

3 系统开发

3.1 系统组成

煤矿井下精确定位系统由智能信息矿灯、LED 可见光定位基站、交换机、服务器、系统软件平台组成，如图 1 所示。系统可应用于煤矿主运输巷、回风巷、采煤工作面、掘进工作面等可安装矿用 LED 照明灯的区域。

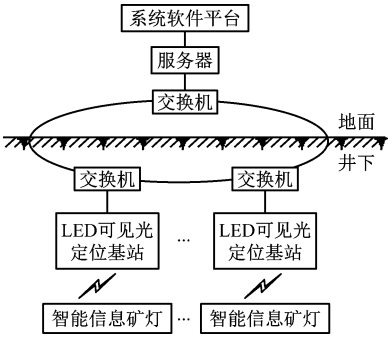

图 1 煤矿井下精确定位系统组成

Fig. 1 Composition of precise positioning system of coal mine underground

智能信息矿灯由煤矿井下人员携带。系统通过 LED 可见光定位基站实现定位数据传输，利用井下环网交换机将定位数据上传至服务器进行存储[13]。系统软件平台通过调取、归类和分析数据，实时显示井下人员位置。

3.2 智能信息矿灯

智能信息矿灯如图 2 所示。其内置核心芯片、加速度传感器、重力传感器、陀螺仪、矢量传感器、4G 模块、WiFi 模块、环境参数传感器等，为实现惯性导航提供了硬件支持。前置摄像头和侧边摄像头为 CMOS 传感器，用于接收 LED 可见光信号。

图 2 智能信息矿灯

Fig. 2 Intelligent information mining-lamp

智能信息矿灯采用 Android 系统平台设计，利用 JAVA 语言开发定位软件，工作流程如图 3 所示。定位软件核心为终端定位算法和 VLC 解调算法。

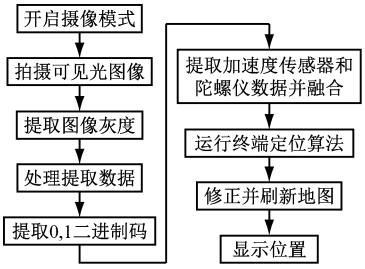

图 3 智能信息矿灯定位软件工作流程

Fig. 3 Working flow of positioning software of intelligent information mining-lamp

智能信息矿灯定位软件控制 CMOS 摄像头采集由 LED 可见光定位基站发出的可见光信号，经数据解调后提取基站 ID，从而实现 VLC 定位；结合 INS 技术，以读取的第 1 个基站可见光信息为参考起点，以第 2 个基站可见光信息为方向支点，其他基站对 INS 数据进行修正，实现在井下巷道中导航及前进方向判定，并根据终端定位算法得到定位位置，实现 VLC 与 INS 融合定位功能。

在 LED 光源下，根据 LED 可见光定位基站内 3 组 LED 灯珠（ID 编码信息灯珠）实现三边定位，结合 TDOA（Time Difference of Arrival，到达时间差）定位算法，形成 VLC 定位模型，得出 LED 光源下的定位坐标。煤矿井下巷道积聚大量粉尘或因湿度很大而产生雾气，导致光源信号误差增大、定位响应时间略有延迟，需对定位算法进行大量训练和优化。

智能信息矿灯灯头光敏传感器接收到 LED 可见光定位基站发出的可见光信号后，自动触发定位软件打开摄像头工作模式；当光敏传感器感光消失 3 s 后，摄像头自动关闭，进入节电休眠状态，等待下

次激活。

智能信息矿灯采用 10 A·h 锰酸锂电池，额定供电电压为 DC3.7 V，工作电流不大于 400 mA，具有可见光定位、摄像、4G 通信、照明、WiFi 通信及环境参数检测等功能，所有功能全部开启时供电时间不小于 11 h。

3.3　LED 可见光定位基站

LED 可见光定位基站由单片机、LED 驱动/控制模块、LED 灯珠阵列、通信模块等组成，如图 4 所示。实物如图 5 所示。通过对 LED 照明灯加装通信和 LED 驱动/控制模块，即可将其改造为 LED 可见光定位基站，布置方便，降低了通信网络使用与维护成本。

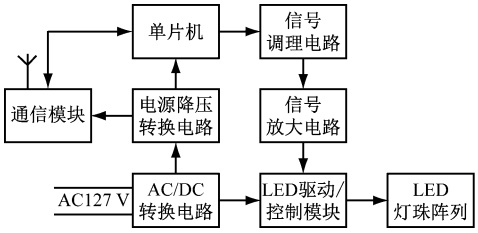

图 4　LED 可见光定位基站组成

Fig. 4　Composition of LED visible light positioning base-station

图 5　LED 可见光定位基站

Fig. 5　LED visible light positioning base-station

LED 可见光定位基站采用开关键控调制方式。电源输入范围为 AC85～265 V，经 AC/DC 转换后输出 DC35 V，再经 LED 驱动/控制模块后驱动 LED 照明灯工作。通信模块具有 RJ45 网络接口和 WiFi 接口功能，满足通信链路接入需求。

LED 可见光定位基站选用 STM32F030F4 单片机，其为 32 位 ARM 微控制器，功耗低，体积小，性价比高。根据开关键控调制原理，单片机按照设定的 ID 编码，以一定频率调制高频 MOSFET 和三极管开关电路，使其高频率通断切换，控制 DC35 V 电源按一定频率通断输出，从而控制 LED 灯珠阵列高速闪烁。LED 灯珠发出的“亮”、“灭”可见光即为调制光脉冲信号，该信号被循环发送，成为可被摄像头识别的可见光 ID 编码信息。

LED 可见光定位基站采用隔爆兼本质安全型式，灯头内加装反光罩，以减少光源散射，并使 LED 照明灯在距地面 4 m 时有效光源覆盖半径达 3 m。采用 3 组 LED 灯珠等距离排布方式，其中 1 组灯珠用于定位和输出基站 ID，另外 2 组灯珠具有定位辅助功能，其 ID 编码信息不计入基站 ID 读取范围。

4　系统测试

4.1　测试过程

系统测试在煤矿井下巷道（高 3 m，宽 4 m）中进行。矿用隔爆兼本质安全型 LED 照明灯布置如图 6 所示。LED 照明灯主要分布于巷道顶部中间位置，以 10 m 等间距直线排布。

图 6　巷道 LED 照明灯分布

Fig. 6　LED lighting distribution in roadway

设置 8 台 LED 可见光定位基站，如图 7 所示。5 台智能信息矿灯安装在安全帽上，灯头保持平直或倾斜角小于 15°。选取 A，B，…，H 为误差参考点，每个参考点与相邻基站在地面上投影点间的距离均为 5 m，在 LED 可见光定位基站下方时定位距离为 0。打开智能信息矿灯定位软件，将智能信息矿灯的摄像头朝向 LED 可见光定位基站，测试人员以正常速度来回行走，当到达 LED 可见光定位基站时，摄像头采集图像后即可获取当前位置。测试进行 5 组，均未漏读，且可随行走路线得到导航轨迹。

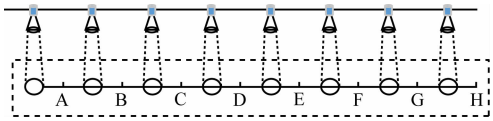

图 7　LED 可见光定位基站布置

Fig. 7　Distribution of LED visible light positioning base-station

为验证 VLC 定位功能，在智能信息矿灯定位软件中设置解码查看模式，在 LED 照明灯下打开该模式，以摄像头每秒扫描 24 次进行解码，解码显示如图 8 所示。清晰的明暗条纹即 LED 可见光定位基站的可见光通信码；方波标线即通信解调码，表示周期性发送帧信息码，每组信息码即 LED 可见光定位基站的 ID 编码信息。图 8 中解码识别出的基站 ID 为 19A。

4.2　测试结果

测试中智能信息矿灯均可通过摄像头采集 LED 可见光定位基站的可见光信息实现成功定位，并在触摸屏上显示定位信息及导航轨迹。测试数据见表 1。测试点 A—H 的误差参考点距离均为5 m。

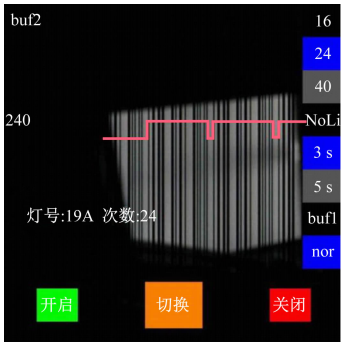

图 8 解码查看模式

Fig. 8 Decoding view mode

表 1 系统测试数据

Table 1 System test data m

矿灯编号	定位测试值								平均误差
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	5.5	5.7	5.6	5.8	5.7	5.6	5.9	5.7	0.688
2	5.6	5.6	5.8	5.9	5.8	5.6	5.9	5.8	0.750
3	5.8	5.9	5.6	5.5	5.8	5.8	5.7	5.9	0.750
4	5.7	5.8	6.0	5.7	5.9	5.9	5.8	5.6	0.800
5	5.8	5.8	5.7	5.4	5.9	5.8	5.6	5.8	0.725

可看出每台智能信息矿灯的 8 组测试点定位平均误差均小于 1 m,证明系统能够实现井下人员定位和导航功能,定位精度较高。

5 结论

(1) 基于 VLC 和 INS 技术原理,设计了一种煤矿井下精确定位系统。该系统可将井下已有的 LED 照明灯改造为 LED 可见光定位基站,矿工仅需携带智能信息矿灯即可完成精确定位,设计安装方便,成本低。测试结果表明该系统定位误差小于 1 m,满足煤矿井下人员定位精度要求。

(2) 该系统目前仍处于试验性研究阶段,需进一步提升、优化其核心算法。

参考文献(References):

[1] 孙哲星. 基于时间测距的矿井人员定位方法研究[J]. 工矿自动化,2018,44(4):30-33.
SUN Zhexing. Research on mine personnel positioning method based on time range[J]. Industry and Mine Automation,2018,44(4):30-33.

[2] 马力,郭辉. 基于 ZigBee 协议的煤矿井下智能传感器[J]. 仪表技术与传感器,2007(8):66-68.
MA Li,GUO Hui. Smart sensor for underground coal mine based on ZigBee protocol [J]. Instrument Technique and Sensor,2007(8):66-68.

[3] 唐钱胜. 基于 LED 通信的室内定位方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
TANG Qiansheng. Research on indoor localization algorithms based on visible light communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2016.

[4] 程强. 基于可见光通信的室内定位方法研究[D]. 广州:广东工业大学,2017.
CHENG Qiang. Research on indoor positioning method based on visible light communication[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology,2017.

[5] 孙洪伟,王旭东,吴楠. 一种基于智能手机的可见光室内信标定位方法[J]. 光通信研究,2017(1):72-75.
SUN Hongwei,WANG Xudong,WU Nan. A scheme of indoor visible light beacon positioning based on smartphone[J]. Study on Optical Communications,2017(1):72-75.

[6] RAJAGOPAL S,ROBERTS R D,LIM S K. IEEE 802.15.17 visible light communication: modulation schemes and dimming support [J]. IEEE Communications Magazine,2012,50(3):72-82.

[7] 骆宏图,陈长缨,傅倩,等. 白光 LED 室内可见光通信的关键技术[J]. 光通信技术,2011,35(2):56-59.
LUO Hongtu,CHEN Changying,FU Qian,et al. Key technologies of indoor visible light communication based on white LED [J]. Optical Communication Technology,2011,35(2): 56-59.

[8] 郭伟龙. 融合多源信息的室内定位算法研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
GUO Weilong. Research on indoor localization based on fusion of multi-source information[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2016.

[9] 龙兴武,于旭东,张鹏飞,等. 激光陀螺单轴旋转惯性导航系统[J]. 中国惯性技术学报,2010,18(2):149-153.
LONG Xingwu,YU Xudong,ZHANG Pengfei,et al. Single-rotating inertial navigation system with ring laser gyroscope [J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2010,18(2):149-153.

[10] 张守祥,李森,宋来亮. 基于惯性导航和里程仪的煤矿采掘设备定位[J]. 工矿自动化,2018,44(5):52-57.
ZHANG Shouxiang, LI Sen, SONG Lailiang. Positioning of coal mining equipments based on inertial navigation and odometer [J]. Industry and Mine Automation,2018,44(5):52-57.

[11] DANAKIS C,AFGANI M,POVEY G, et al. Using a CMOS camera sensor for visible light communication [C]//IEEE Globecom Workshops, Anaheim, 2012: 1244-1248.

[12] 郝菁,蔚保国,何成龙. 基于惯导/数据链的动态相对定位方法[J]. 计算机测量与控制,2018,26(10):191-195.
HAO Jing,YU Baoguo,HE Chenglong. Dynamic relative positioning method based on inertial navigation and data link[J]. Computer Measurement & Control,2018,26(10):191-195.

[13] CURRAN M, ZHENG Kai, GUPTA H, et al. Handling rack vibrations in FSO-based data center architectures [C]//International Conference on Optical Network Design and Modeling,Dublin,2018: 47-52.