

文章编号:1002-2082(2017)03-0358-07

基于智能手机的快速可见光室内定位系统

杨 桢^{1,3}, 方俊彬^{1,2,3}, 陈 哲^{1,2}

(1. 暨南大学 广东省可见光通信工程技术研究中心, 广东 广州 510632; 2. 暨南大学
广州市可见光通信工程技术重点实验室, 广东 广州 510632; 3. 暨南大学 光电工程系, 广东 广州 510632;

摘 要:基于智能手机的可见光定位不仅定位精度高,还兼具了可见光通信与移动互联网的优势。由于图像处理的高计算复杂度,现有系统定位速度较低无法支持实时导航。论文提出了一种快速和高精度的可见光室内定位系统,通过设计无闪烁线路编码方案和轻量级图像处理算法降低定位时延,同时还具有抑制调制闪烁和支持多级调光的优点。市售 Android 智能手机完成了原型系统开发和现场测试,实验结果显示,系统平均定位精度可达到 7.5 cm,定位时间可低至 22.7 ms(单灯)和 35.7 ms(双灯),可支持移动速度高达 18 km/h 的实时室内导航。

关键词:可见光通信;室内定位;线路编码;图像处理

中图分类号:TN929.12

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201738.0301004

Fast visible light indoor positioning system based on smart phone

Yang Zhen^{1,3}, Fang Junbin^{1,2,3}, Chen Zhe^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center on Visible Light Communication, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Guangzhou Municipal Key Laboratory of Engineering Technology on Visible Light Communication, Jinan University, Guangzhou 510632, China;
3. Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Visible light positioning (VLP) based on mobile phone not only has high positioning accuracy, but also has advantages of visible light communication and mobile internet. Due to high computational complexity of image processing, most existing system can not support real-time navigation because of its low positioning speed. A fast indoor VLP system with high accuracy is proposed in this paper. Positioning latency is reduced by designing elaborate flicker-free line coding scheme and lightweight image processing algorithm. In addition, this system has advantage of supporting flicker mitigation and dimming, which are important for illumination. Android-based system prototype has been developed for field tests on an off-the-shelf smartphone. Experimental results show that it can achieve high accuracy of 7.5 cm, and positioning time is reduced to 22.7 ms for single-luminaire and to 35.7 ms for dual-luminaries respectively. In addition, it supports real-time indoor navigation for users moving at a speed of up to 18 km/h.

Key words: visible light communication; indoor positioning; line coding; image processing

收稿日期:2016-06-28; 修回日期:2016-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(61401176);广东省自然科学基金项目(2014A030310205);广东省科技计划项目(2014B010120002, 2016A010101017);广东省高等学校项目(YQ2015018);广州市科技计划项目(201605030002);广东大学生科技创新培育专项资金(pdjh2016b0057)。

作者简介:杨桢(1990—),男,福建连城人,硕士研究生,主要从事可见光室内定位导航技术研究。

E-mail: yzy0903@gmail.com

通信作者:方俊彬(1981—),男,广东惠来人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事可见光通信与量子保密通信研究工作。

E-mail: junbinfang@gmail.com

引言

与传统射频定位技术相比,可见光定位(visible light positioning, VLP)技术具有定位精度高、“照明定位两用”且免疫电磁干扰的优势,故而被认为是极具前景的室内定位导航解决方案^[1],可应用于大型场馆、室内机器人以及室内泊车系统等。以内置摄像头作为可见光信号接收器,智能手机是实现 VLP 室内定位系统并且与其他移动应用集成的理想平台。目前已有几种基于智能手机的 VLP 实验系统^[2-5],但都存在定位精度较低^[2-3]或定位时延过高^[4-5]的问题,有些系统还需要额外的定制硬件,此外,这些系统并未考虑对照明调光功能的支持,削弱了 VLP 系统照明的功能性。

本文提出了一种基于智能手机的快速、高精度可见光室内定位系统,通过设计无闪烁线路编码方案和轻量级图像处理算法,显著降低了精确定位的计算复杂度和时延,并且能抑制调制闪烁和支持 LED 灯具多级调光,无需额外硬件。实验结果表明:系统的平均定位精度达到 7.5 cm,平均定位时间分别为 22.7 ms(单灯)和 35.7 ms(双灯),可支持移动速度高达 5 m/s(约 18 km/h)的实时室内导航。

1 可见光定位系统基本组成

1.1 系统硬件与工作流程

本文提出的 VLP 系统主要由两部分硬件组成:VLP 灯具和智能手机,系统结构如图 1 所示。

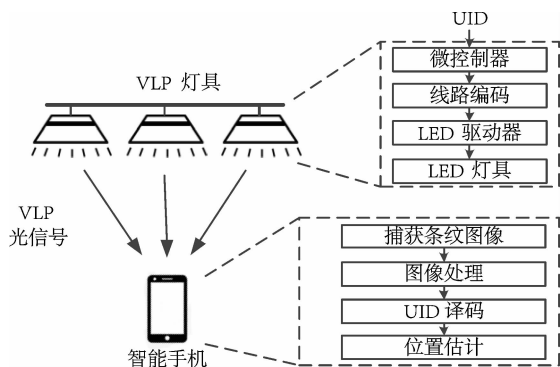


图 1 VLP 系统架构

Fig. 1 VLP system architecture

VLP 灯具的主要功能是提供照明并发送可见光定位信号。VLP 灯具内嵌的微控制器对预分配的唯一标识符(unique ID, UID)进行线路编码,得到适合可见光传输线路和照明功能的调制码字,再由 LED 驱动器以开关键控(OOK)调制方式驱动 LED 灯具“开/关”发送对应的可见光信号;每具 VLP 灯具的 UID 唯一地与该 VLP 灯具安装位置的空间坐标(x, y)相关联,所有的 VLP 灯具及安装坐标构成“UID-坐标”映射。

智能手机的主要功能是以成像的方式接收可见光定位信号并完成定位计算。智能手机的内置摄像头通常采用 CMOS 图像传感器,其成像方式为逐行曝光(类似卷帘快门)^[6],所以对 VLP 灯具所发送的 0/1 交替的可见光信号进行成像时,将其捕获的亮暗相间的条纹图像(如图 2 所示)进行图像处理(包括条纹区域提取、条纹亮度扫描),得到调制码字后,译码得到 UID 并查询“UID-坐标”映射即可获得该 UID 所对应的空间坐标。如果所捕获的图像中包含多组条纹图案(来自多具 VLP 灯具),那么采用基于视觉分析的定位算法^[7]就可以计算得到 cm 量级的精确坐标。

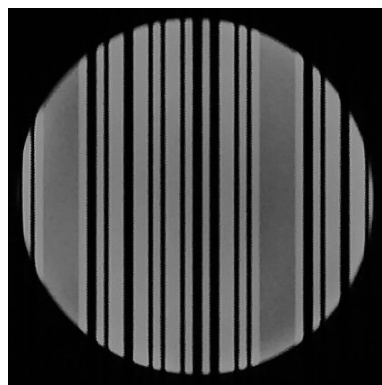


图 2 智能手机卷帘快门摄像头捕获的条纹图像

Fig. 2 Fringe image captured by smartphone's rolling shutter camera

1.2 基于视觉分析的定位算法

如图 3 所示,假设手机水平放置,且捕获图像中包含 2 组条纹,待求的定位坐标为(X, Y),记 2 个 VLP 光源的坐标分别为(X_1, Y_1)和(X_2, Y_2),2 具 VLP 灯具之间的空间距离为 S_1 ;以图像的左上角为图像坐标系的原点(0,0),则图像的中心坐标为(X_{mid}, Y_{mid}),两组条纹中心在图像中的像素坐

标分别为 (X_{1f}, Y_{1f}) 和 (X_{2f}, Y_{2f}) , 图像中 2 组条纹之间的像素距离为 S_2 , 则由以下几何关系:

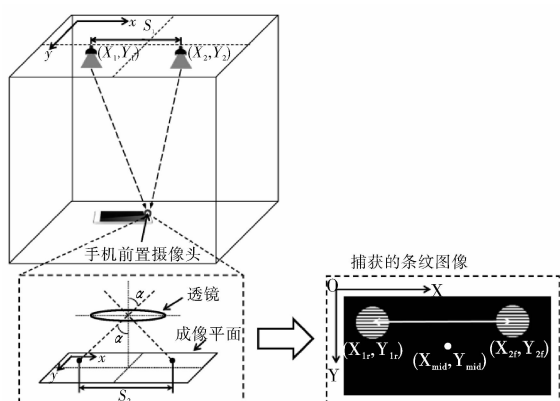


图 3 基于视觉分析的定位原理

Fig. 3 Positioning principle based on vision analysis

$$\begin{cases} \frac{S_1}{S_2} = \frac{X_1 - X}{X_{1f} - X_{mid}} = \frac{X_2 - X}{X_{2f} - X_{mid}} \\ \frac{S_1}{S_2} = \frac{Y_1 - Y}{Y_{1f} - Y_{mid}} = \frac{Y_2 - Y}{Y_{2f} - Y_{mid}} \\ S_1 = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \\ S_2 = \sqrt{(X_{1f} - X_{2f})^2 + (Y_{1f} - Y_{2f})^2} \end{cases} \quad (1)$$

可求得当前坐标 (X, Y) 为

$$\begin{cases} X = X_1 + (X_{mid} - X_{1f}) \times \frac{S_1}{S_2} = \\ X_2 + (X_{mid} - X_{2f}) \times \frac{S_1}{S_2} \\ Y = Y_1 + (Y_{mid} - Y_{1f}) \times \frac{S_1}{S_2} = \\ Y_2 + (Y_{mid} - Y_{2f}) \times \frac{S_1}{S_2} \end{cases} \quad (2)$$

2 快速高精度可见光室内定位系统

本文所提出的 VLP 系统主要改进工作包括: 在发送端支持调光的无闪烁线路编码方案及在接收端的轻量级图像处理算法。

2.1 支持多级调光的无闪烁线路编码

为了在进行数据调制时不影响照明功能, VLP 系统必须考虑 2 个与照明相关的要求: 抑制调制闪烁和支持多级调光比^[8]。按照 IEEE 组织的建议^[9], LED 的亮度变化频率必须大于 200 Hz, 以避免产生人眼能够感知的闪烁。即使如此, 如果码字中存在长连 0 或长连 1, LED 实际“开/关”频率降低, 依然可能导致闪烁, 因此需要线路

编码限制码字中 0/1 的游程长度以避免闪烁; 实际应用中, 用户还需要调节 LED 照明强度。VLP 灯具的平均光强度由码字传输时间内 LED 的开/关时间比例所决定, 因此还需要线路编码能够灵活调节开/关时间比例以实现目标调光比。

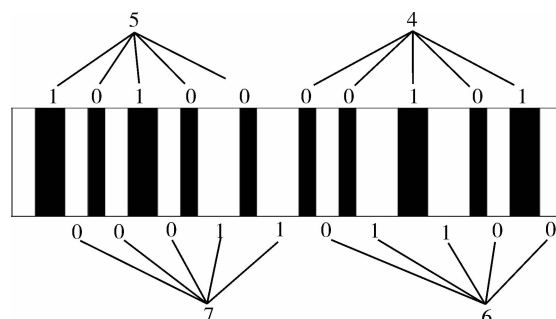


图 4 基于 ITF 条形码的无闪烁线路编码方案

Fig. 4 Flicker-free line coding scheme based on ITF barcode

IEEE 802.15.7 标准^[8]建议在频率低于 200 kHz 的 OOK 调制情况下使用曼彻斯特码, 以消除调制闪烁和实现调光支持。曼彻斯特码是一种游程长度有限的线路编码, 能避免连续 1 或 0, 并且它是直流平衡的, 因此可以通过插入补偿符号以实现任意调光比。然而, 曼彻斯特码将一个比特编码为 2 个符号, 其线路编码效率只有 1/2, 在插入补偿符号后其编码效率和比特传输速率还会进一步降低。

本文基于条形码中常用的交叉二五 (interleaved two-of-five, ITF) 码^[10]提出了一种支持调光的无闪烁线路编码, 不仅能达到比曼彻斯特码更高的编码效率, 同时能有效地消除闪烁并支持多级调光比, 如图 4 所示。本文提出的编码方案对十进制数字成对地进行编码。第 1 数字 (“5”) 被编码在 5 个暗条纹中, 而第 2 数字 (“7”) 被编码在与它们交错的 5 个亮条纹中, 且每 5 个暗 (亮) 条纹中的 2 个是宽条纹, 而其他 3 个是窄条纹, 调制时将码字中的比特 “0” 和 “1” 分别对应为窄条纹和宽条纹。因为亮暗条纹交错, 所以 LED 灯具快速地交替 “开/关”, 且 “开/关” 符号的持续时间比例是恒定的, 即 LED 灯具在数据传输期间亮度稳定, 不会产生闪烁。此外, 由于每 2 个十进制数可以表示总共 100 个不同的组合, 因此这种方案的编码效率是 $\log_2(100)/10 = 0.664\ 39$, 高于曼彻斯特码。

本文所提出的线路编码方案还支持多级调光。如上所述,由于调光比实际上是LED灯具“开”符号的持续时间(或亮条纹的宽度)的平均比例,而每帧条纹图像包含20个亮暗条纹(包括4对宽亮/暗条纹、6对窄亮/暗条纹),因此调光比 R_{dim} 可以由以下公式确定:

$$R_{dim} = \frac{4W_{b1} + 6W_{b0}}{4W_{b1} + 6W_{b0} + 4W_{d1} + 6W_{d0}} \quad (3)$$

式中: W_{b1} (W_{b0})是宽(窄)亮条纹的持续时间; W_{d1} (W_{d0})是宽(窄)暗条纹的持续时间。通过调整两种条纹的持续时间可以实现多级的调光比。

2.2 轻量级图像处理

针对复杂的图像处理^[11]增加定位时延问题,本文提出一种轻量级图像处理算法以提高定位速度,算法处理流程如图5所示。首先,手机摄像头在低曝光模式下获得一幅原始图像(如图5(a)),

因为曝光不足,图像中除LED灯具发光面区域存在条纹图案之外,其他区域都是黑暗的,逐行曝光的成像机制还使得所有条纹在图像中是垂直的。然后,将原始图像二值化^[12](如图5(b)),从而消除原始图像中的斑点。二值化图像中除了条纹图案所在的行(列)之外,大多数行(列)中的像素值(白色为0xFF,黑色为0x0)的总和接近于零。接着,按列(垂直)累计像素值,可以快速地在水平轴上定位条纹图案的起始和结束位置。类似地,按行(水平)累计像素值可以在垂直轴上定位条纹图案的边界,从而获得条纹图案的矩形区域(如图5(c)中的矩形)。提取出该条纹区域后(如图5(d)),按ITF编码规则反向解码即可恢复原始码字。采用上述算法,VLP系统即使在市售智能手机上也只需要几十ms的图像处理时间。

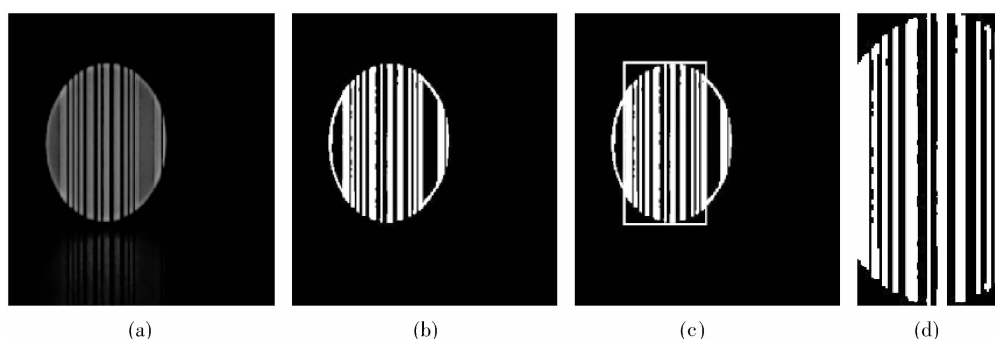


图5 条纹提取处理流程

Fig. 5 Processing pipeline of fringes extraction

3 性能测试与实验结果

本文进行了一系列的现场实验以测试所提出的VLP系统在定位精度、定位速度和解码成功率方面的性能。现场环境如图6(a)所示。发送端采用直径17.5 cm的18 W商用LED灯具,20个VLP灯具在天花板上沿直线安装,VLP灯具到地

面的垂直高度为2.8 m,2个VLP灯具之间的水平间距为1.65 m;接收端使用配备Qualcomm Snapdragon 810 CPU和500万像素前置摄像头的OnePlus 2智能手机,图像分辨率为1 280 pixel×960 pixel。

3.1 定位精度

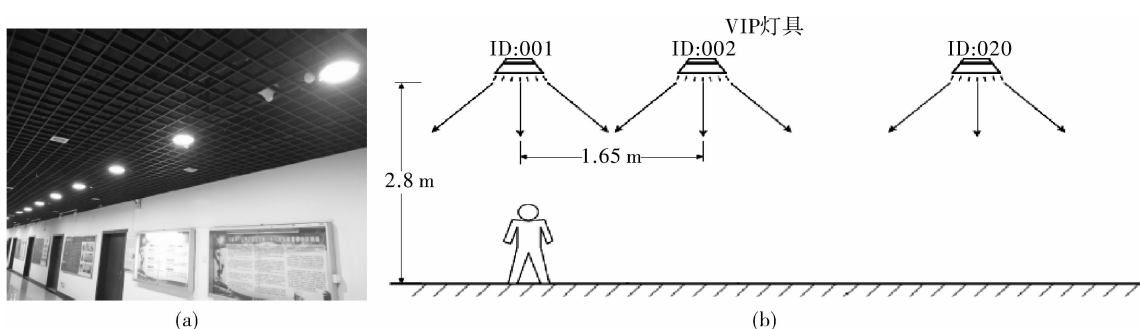


图6 现场环境与实验设置

Fig. 6 Field environment and experimental setup

本实验主要测试摄像头视场中存在多于一个 VLP 灯具时的定位精度。在实验现场中随机选择 100 个位置,并确保在每个位置处至少能拍到 2 个 VLP 灯具,然后通过比较实际空间位置和估计位置来计算每个位置的定位误差。图 7 为定位误差(e)的累积分布函数(CDF)与定位精度(A_c)的关系,其中, $CDFe(A_c)=P(e\leq A_c)$ 。从图 7 中可见,定位误差的上限为 10.7 cm,平均定位精度为 7.5 cm。

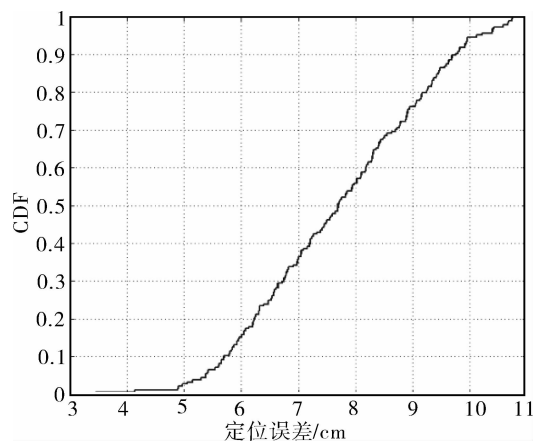


图 7 定位精度

Fig. 7 Positioning accuracy

3.2 定位耗时

定位耗时是影响定位系统实用性的另一个重要因素,Luxapose 的平均定位时间为 9 s,用户的移动速度不能超过 6.75 cm/s($=0.024\ 3\text{ km/h}$)^[4],远低于正常步行速度。我们分别在单灯和双灯的情况下各进行了 100 次测试,结果如图 8 所示,对于摄像头视场仅存在一个 VLP 灯具(单灯)的情况,本系统平均定位耗时为 22.7 ms,最高定位耗时不超过 39 ms;对于摄像头视场中存在 2 个 VLP 灯具(双灯)的情况,由于条纹图案的增加,平均定位耗时增加到 35.7 ms,最高定位耗时不超过 67 ms,且在 90% 的测试中定位耗时低于 48 ms。

相比之下,Luxapose 系统^[4]在 MacBook Pro 笔记本电脑(2.7 GHz Core i7 CPU)上处理 3 300 万像素的图像平均耗时 0.3 s,因为智能手机上无法完成该图像处理任务,因此,Luxapose 需要额外的 3.41 s 将手机所捕获的图像上传到 MacBook Pro 进行处理。

3.3 解码成功率

解码成功率是体现 VLP 系统鲁棒性的一项

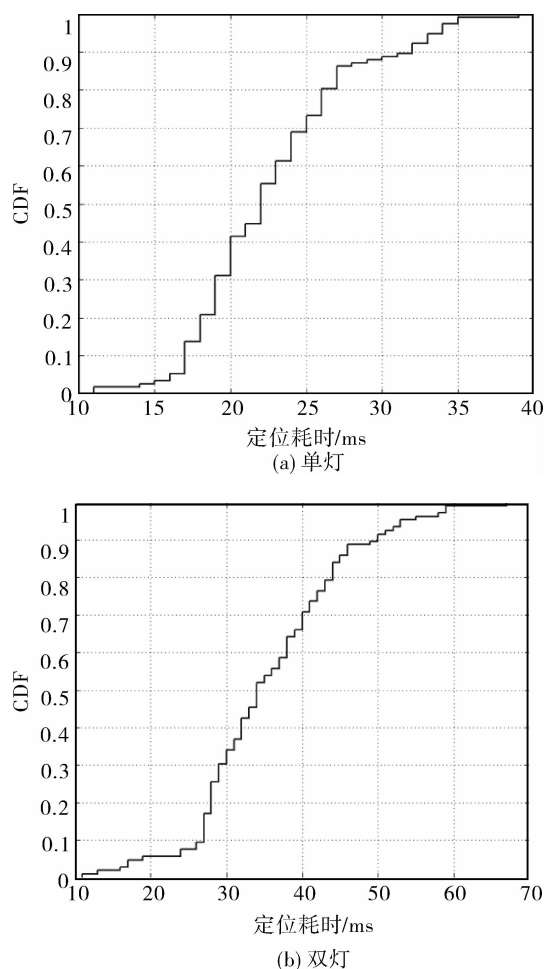


图 8 定位耗时

Fig. 8 Positioning time

重要指标。因为解码错误会得到错误的位置信息,而解码失败则需要重新解码增大定位耗时,从而导致不稳定的定位服务。图 9 为解码成功率随着灯具和智能手机之间垂直距离变化的测试结果。解码成功率在垂直距离不大于 1.8 m 时保持在 90% 以上,在距离小于 1.3 m 时达到最高(100%)。作为手持设备,智能手机距离地面的垂直高度通常大于 1.0 m、距离天花板不大于 1.8 m,故此该解码成功率可以确保 VLP 系统在实际应用中的鲁棒性。如果垂直距离增加到 1.8 m 以上(如某些地面机器人设备),LED 发光面所成的条纹图案过小将导致解码成功率迅速下降,针对这些特殊应用,可以通过增大摄像头分辨率以获得更细致的条纹图案进行改善。

3.4 移动速度

基于本文提出的 VLP 系统以及硬件平台,开发了一个 Android 实时室内定位导航应用程序(如

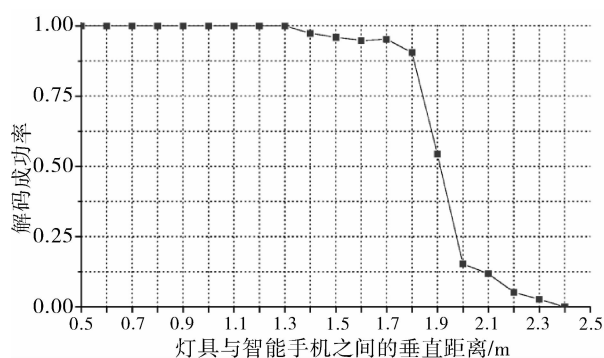


图9 解码成功率

Fig. 9 Decoding success rate

图10所示)。该应用程序具有定位、导航以及信息推送等功能,当用户选定目的地后,应用程序采用Dijkstra算法进行路径规划(图10中从A到C的折线为推荐路径),随着用户的移动,应用程序实时更新用户位置,推送邻近地点的相关信息,并持续引导用户向目的地前进。图10中A到B的轨迹表示用户已经经过的路线,而B到C的直线表示到达目的地的剩余路线。测试结果显示,本VLP系统和应用程序可以在用户不高于5 m/s (18 km/h)的移动速度下实时定位和导航。

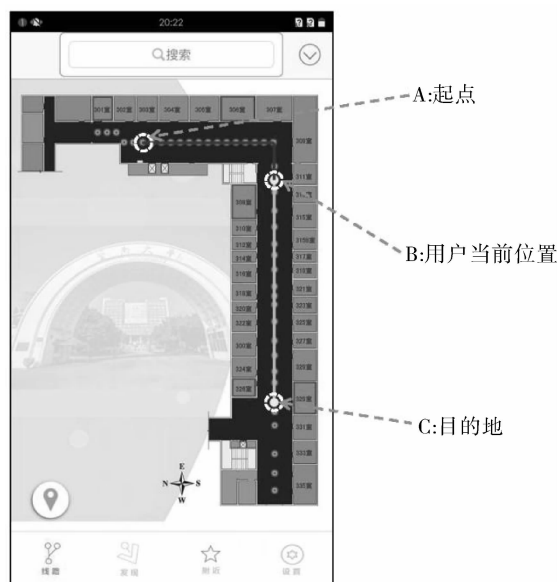


图10 基于本文提出的室内定位系统开发的Android应用程序

Fig. 10 Android application based on proposed indoor positioning system

4 结论

本文设计了一种基于智能手机的快速、高精

度可见光室内定位系统,提出了支持调光的无闪烁线路编码方案和轻量级图像处理算法,系统的平均定位精度可达到7.5 cm,在市售智能手机上的平均定位时间降低到35.7 ms,支持移动速度不超过5 m/s(18 km/h)的实时导航。与其他可见光定位系统相比,本系统能在实现高定位精度的同时完成快速定位,能支持室内机器人、大型场馆中的行人、室内停车场低速车辆的实时定位导航,系统还兼顾了照明系统对无闪烁和多级调光支持的要求,具有更高的实用性和应用前景。

参考文献:

- [1] Armstrong J, Sekercioglu Y A, Neild A. Visible light positioning: a roadmap for international standardization [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 68-73.
- [2] Li Liquan, Hu Pan, Peng Chunyi, et al. Epsilon: A visible light based positioning system [C]//11th USENIX symposium on networked systems design and implementation (NSDI 14). CA, USA: USENIX Association Berkeley, 2014: 331-343.
- [3] Rajagopal N, Lazik P, Rowe A. Visual light landmarks for mobile devices [C]//Proceedings of the 13th international symposium on information processing in sensor networks. New York: IEEE Press, 2014: 249-260.
- [4] Kuo Y S, Pannuto P, Hsiao K J, et al. Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light [C]//Proceedings of the 20th annual international conference on mobile computing and networking. New York: ACM, 2014: 447-458.
- [5] Yang Z, Wang Z, Zhang J, et al. Wearables can afford: Light-weight indoor positioning with visible light [C]//Proceedings of the 13th annual international conference on mobile systems, applications, and services. New York: ACM, 2015: 317-330.
- [6] Chow C W, Chen C Y, Chen S H. Enhancement of signal performance in LED visible light communications using mobile phone camera [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1-7.
- [7] Kim J Y, Yang S H, Son Y H, et al. High-resolution indoor positioning using light emitting diode visible light and camera image sensor [J]. Iet Optoelec-

- tronics, 2016,10(5):. 184-192.
- [8] Rajagopal S, Roberts R D, Lim S K. IEEE 802. 15. 7 visible light communication: modulation schemes and dimming support [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 72-82.
- [9] IEEE. IEEE standard PAR 1789-2015 recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers[S]. New York: IEEE, 2015;
- [10] Sriram T, Rao K V, Biswas S, et al. Applications of barcode technology in automated storage and retrieval systems[C]//Industrial electronics, control, and instrumentation. New York :IEEE, 1996: 641-646.
- [11] Chen Guannan, Yang Kuntao, Xie Zhiming, et al. Edge recognition method for image segmentation based on depth-first traversal[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1):14-17.
- 陈冠楠, 杨坤涛, 谢志明, 等. 基于深度优先遍历的图像边缘检测方法[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 14-17.
- [12] Yang Lihong, Shi Huanfang, Chen Zhili, et al. Arithmetic to process the Mach-Zehnder interference fringe patterns collected by CCD[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(2): 40-42.
- 杨利红, 施浣芳, 陈智利, 等. 基于 CCD 采集的 Math-Zehnder 干涉条纹图的处理算法[J]. 应用光学, 2005, 26(2): 40-42.