

基于启发式路径规划与 IMU 室内导航的关键技术*

张小东^{1,2}, 战德臣¹, 王宇辰², 屈锦春²

¹(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

²(哈尔滨工业大学(威海) 计算机科学与技术学院, 山东 威海 264209)

通讯作者: 张小东, E-mail: z_xiaodong7134@163.com

摘要: 针对基于 IMU (inertial measure unit) 的航位推算精度不高与室内楼层间路径优化困难等问题, 首先提出了基于启发式动态规划的三维路径规划算法 A-DP, 然后, 以最优路径为约束, 改进了 HDE 算法 (SPM-HDE), 提高了行进方向的准确度, 最后, 结合其他 IMU 导航技术, 完成在室内三维空间中的导航。经检验, 算法效率与航位推算的精确度均有较大提高。

关键词: A* 算法; IMU (inertial measure unit); 动态规划; A-DP; SPM-HDE

中文引用格式: 张小东, 战德臣, 王宇辰, 屈锦春. 基于启发式路径规划与 IMU 室内导航的关键技术. 软件学报, 2015, 26 (Suppl. (1)): 78-89. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15009.htm>

英文引用格式: Zhang XD, Zhan DC, Wang CY, Qu JC. Key technologies of indoor navigation based on heuristic path planning and IMU. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015, 26(Suppl. (1)): 78-89 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15009.htm>

Key Technologies of Indoor Navigation Based on Heuristic Path Planning and IMU

ZHANG Xiao-Dong^{1,2}, ZHAN De-Chen¹, WANG Chen-Yu², QU Jin-Chun²

¹(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

²(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: In order to address the low accuracy issue of IMU-based (inertial-measure-unit-based) dead reckoning and the difficulty of path optimization between the indoor floors and other problems, a series of work are carried out in this paper. First of all, a three-dimension path optimization algorithm, A-DP, is proposed based on the heuristic dynamic programming. Then, with the optimal path constraint, the HDE algorithm and the accuracy of the direction of travel (SPM-HDE) are improved. Finally, combining with IMU navigation technologies, the navigation in indoor three-dimensional space is accomplished. Test results show that both the efficiency of the algorithm and the accuracy of the dead reckoning are greatly improved.

Key words: A* algorithm; IMU (inertial measure unit); dynamic programming; A-DP; SPM-HDE

当前, 利用移动设备为用户提供更加丰富和完善的服务已成为移动计算领域的研究热点, 而基于位置的服务 (location based service, 简称 LBS) 就是其中之一。基于 GPS 的室外导航已经普及。LBS 开始进入到大型综合写字楼或开放式大型商场的导航中。众多的写字间或开放式货架纵横交错, 对于室内导航的精确度提出了很大的挑战。由于楼宇的屏蔽作用, GPS 在室内基本无法工作。因此, 如何在楼宇内运用移动设备进行导航, 依然是亟待解决的科学问题。导航通常被分为两个阶段: 路径规划和航位推算。在实际应用中, 这两个阶段交替执行。

路径规划是指在旅行前或旅行中为旅行者提供行进的参考路线, 作为一个经典问题, 解决方案很多, 可以分为: (1) 基于图论的算法, 如 Dijkstra 及其改进算法^[1-3]、Floyd 算法等, 但此类算法直接搜索全局空间而不考虑目

* 基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAF12B16); 国家自然科学基金 (61273038); 山东省科技攻关项目 (2010GZX20126, 2010GX10104, 2010GGX10116)

收稿时间: 2015-04-15; 定稿时间: 2015-07-20

标信息,导致路径求解时间较长;(2) 基于智能控制技术的算法^[4],如遗传算法 GA,但此类算法存在编码长度变化范围大、求解效率低、适用于规模较小的问题^[5];(3) 基于传统人工智能理论的算法,如 A^* 及其改进算法^[6,7],这类算法加入了启发式函数,使运算速度有所提高,适用于全局环境信息已知的路径规划方法,同时也适用于路径的二次规划。

航位推算技术按照物理特性的不同通常可分为 3 类:惯性导航技术、机械波技术和电磁波技术。机械波技术涉及声音和超声波等的采集,需要用较为特殊的设备,普及困难。当前应用较为普遍且为研究热点的是惯性导航和电磁波中的 Wi-Fi 指纹定位技术。其中,Wi-Fi 指纹定位分为训练和定位两个阶段。在训练阶段,收集在指定采样点采集到的 AP(access point)的信号强度,建立信号指纹数据库。在定位阶段,移动设备将采集到的各个 AP 的信号强度和指纹数据库中的数据进行对比,找出与当前接收信号强度最接近的一条指纹记录,并将该记录中的位置信息作为移动设备的位置。由此可以看出,指纹定位技术对于信号源及训练集的依赖性很强且需要通过无线网络与数据库进行通信,在 Wi-Fi 设备布局合理且信号稳定的前提下,精度与效率较高^[8,9],否则误差巨大。而惯性导航技术 INT(inertial navigation technology)中的惯性测量单元 IMU(inertial measure unit)已被普遍地集成于智能手机中,不依赖于其他的外部设备,不涉及上述问题。理论上,实施导航更为理想。因此,本文研究并设计出一种基于启发式路径规划与 IMU 技术的室内导航系统。它将 A^* 算法与动态规划相结合,并加入了位置转移传递参数来解决室内三维空间路径规划问题,还能对 IMU 在导航中产生的累积误差进行适当的修正,以确保导航的正确性。系统不需要部署任何外部设施,在移动设备上提供的导航服务实现简洁,具有良好的可扩展性。

本文第 1 节介绍相关的研究工作,给出路径规划及基于 IMU 测算的经典算法及研究现状。第 2 节根据实际需求提出面向三维路径规划的 A -DP(A^* and dynamical programming)算法。第 3 节详细地论述基于 IMU 导航技术,结合 A -DP 算法建立 SPM-HDE 反馈控制系统。第 4 节通过实验分析系统及相关算法的性能,并与其他定位方法进行对比分析,以论证该方法的有效性。最后,对全文进行总结,并讨论未来的研究方向。

1 相关研究

彭飞等人^[10]在 A^* 算法中引入了基数堆(radix heaps)结构对图中已标记的顶点进行排序,缩减了算法的时间复杂度,再利用启发式搜索和地图分级搜索技术减小搜索空间,从而获得最短路径规划算法的高效率实现。为解决环境信息局部变动情况下的路径规划问题,TrovatoKI^[11]提出了微分 A^* 算法,但该算法处理流程复杂,实现需要大量数学计算和推导且规划路径中存在折线多、转折次数多等问题。为改进线路质量,王红卫^[12]建立了平滑 A^* 算法模型,模型中运用带浮点运算的欧拉距离来计算启发距离。其实,在栅格地图中,使用基于整型运算的切比雪夫距离也可获得平滑线路,效率明显优于欧拉距离的运算。上述 A^* 算法都是在平面图中搜索最短距离,而计算带有高度的三维空间最优路径时,存在一定的困难。本文在 A^* 算法中引入位置传递算子 T ,结合动态规划后,解决了带有多楼层空间最短距离的搜索问题。

INT 的主要传感器是 IMU。它是由三轴加速计(运动传感器)、三轴陀螺仪(角速度传感器)和磁力计(磁场强度和方向)组成的。行人航位推算组件 PDRC(pedestrian dead reckoning component)接收来自 IMU 的信息,结合人体运动特征(如步频、步长和方向等),计算出行人当前的航位信息。但由 IMU 测算出的数据存在误差,且这种误差会随着行进的过程而不断累积,造成较大的导航偏差。因此,在相关研究中,学者们运用了多种手段进行纠正。Foxlin^[13]仅利用固定在脚上的 IMU 实现了行人航位推算。为了校正每一步的位移误差,扩展了用于滤噪的卡尔曼滤波(extended Kalman filter,简称 EKF),提出了 ZUPTs(zero-velocity updates)算法,从整体上提升了系统的定位精度。Jiménez 等人^[14]在 Foxlin 工作的基础上,建立了 INS-EKF-ZUPT(IEZ),利用零角速度更新(zero angular rate update,简称 ZARU)和启发式方向消除(heuristic heading reduction)进一步降低了系统的方向误差。Beauregard^[15]实现了一个将 IMU 固定在头盔上的行人航位推算系统,并将实验结果与 GPS 结果进行了比较。Kim 等人^[16]分析了人的行走模型后,提出了步频探测和步长估计算法,利用陀螺仪和磁力计来确定人行走的方向,最终实现了行人航位推算。利用环境地形或地图可对航位推算进行纠错。Borenstein 等人^[17]利用建筑物自身存在的主方向,提出了启发式偏移消除算法(heuristic drift elimination,简称 HDE),该算法能够使行走方向不断向主方向靠近,从而

有效地消除了陀螺仪产生的偏移,提高了行人航位推算方向的精确性.Abdulrahim 等人^[18]在使用扩展卡尔曼滤波器和 ZUPT 算法的基础上,引入建筑物自身的信息对用户的行走方向进行了校正,获得了更为精确的结果.Aggarwal 等人^[19]将地图信息加入行人航位推算系统,不仅提高了系统的精确性,还扩展了系统的使用范围.Nam^[20]将室内环境中的拐角、房间、楼层、楼梯等建筑的位置信息与 IMU 的信息相结合,实现了一个基于地图匹配的室内行人航位推算系统.在 Rai^[21]提出的 Zee 系统中,将 Wi-Fi 指纹与 IMU 测算相结合,利用 IMU 独立测算步频与方向,用粒子滤波测算位置与步频特征,采用反馈系统提高测算精度,运用基于 Wi-Fi 的粒子初始化来加速收敛速度.由于不完全依赖于 Wi-Fi 设备,从而削弱了 Wi-Fi 指纹定位的负面影响.利用上述研究成果,本文构建了空间栅格地图,结合所提出的 A-DP 算法和改进了的 HDE 算法,建立了精度较高的室内导航系统.

2 基于 A*算法的三维线路规划

2.1 问题分析

如图 1(a)所示的两层楼宇,含有 4 个安全通道(exit)、两部直行电梯(elevator)、两部位于不同位置的扶梯:一部为上行(Escalator-up 入口-Escalator-exit 出口),一部下行(Escalator-down 入口-Escalator-exit 出口).若出发点 s 在 1 楼,终点 t 在 2 楼,求从 s 到 t 的最短路径.对楼宇中路径规划特点的分析如下:

(1) 同层路径规划:需要绕过障碍物,使用 A*算法、Dijkstra 算法等均能实现,而 A*算法性能更优.

(2) 不同层路径规划:由图 1(a)可知,楼层之间通过固定位置及数量的楼梯相连接,不是任意位置都连通.可能存在直行电梯不停留、不到达的楼层,扶梯只出现在固定的几层且出、入口不一定相同等问题,这些都为不同楼层路径规划增加了困难.目前,应用于这种三维楼宇导航的算法不多.Dijkstra 算法是一种穷举测试,经过三维化处理可以得到最优解,但运算量巨大.A*算法可进行三维化处理,但是因楼梯较多而会产生大量回溯,从而导致效率大幅度降低.

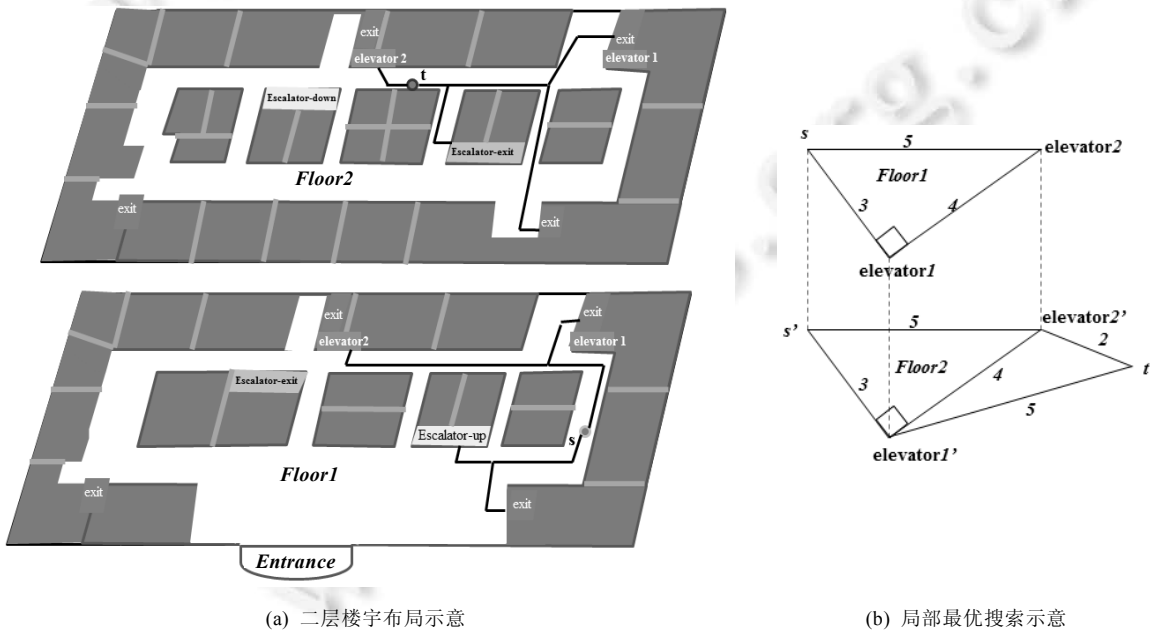


图 1 楼宇路径规划示意图

由(1)、(2)分析可知,产生这些问题的根本原因是由三维空间的连通性造成的.既然 A*在同层路径规划中可以高效得出最优解,那么,是否可以通过累积每一层的最优解而得到全局最优?答案是否定的.为了绘图方便,本文将图 1(a)做了翻转,并做了适当的抽象,如图 1(b)所示,只保留两部直梯,假设用 A*算法可得到 s 到 $elevator1$

最短路径为 3, s 到 $elevator2$ 为 5, 则按贪心策略, 选择 $s \xrightarrow{A^*} elevator1 \rightarrow elevator1' \xrightarrow{A^*} t$ 线路, 总距离为 3+高度+5; 而选择 $s \xrightarrow{A^*} elevator2 \rightarrow elevator2' \xrightarrow{A^*} t$ 线路, 总距离为 5+高度+2, 显然, 后者要优于前者. 因此, 在三维楼宇路径规划中基于 A^* 算法的贪心策略是不可行的. 为此, 本文结合楼宇的结构特点, 提出了将 A^* 算法与动态规划相结合的 A -DP 算法来解决楼宇的三维路径规划问题.

2.2 基于 A -DP 算法的三维路径规划

楼宇的定位导航是基于三维空间的, 不同的楼层是依靠固定数目与位置的楼梯连接的, 路径规划的起点与终点可能位于不同的楼层. 基于这些实际需求, 本文采用栅格地图表示每层楼的平面布局, 引入了标定楼梯位置的位置传递算子 T , 将不同楼层的栅格地图串接起来, 定义如下:

定义 1. 设楼宇地图为 $G=(S, V)$, 其中, S 为 G 中所有栅格坐标的集合, V 为 G 中所有栅格的语义集合, S 与 V 结合起来表示楼宇的布局.

定义 2. 设 G 中的栅格 i 坐标为 $s_i=(x_i, y_i, z_i)$, 其中, x_i, y_i 分别为 G 中的纵横坐标, z_i 表示楼层, 若用 M 表示楼层数最大值, 则 $0 \leq z_i \leq M$. 由此定义可知, $S=\{s_1, s_2, \dots, s_M\}$.

定义 3. 设 V 是一个枚举类型集合, 表示为 $V=\{1, 2, 3, \dots, n\}$, 其中, $n \in \mathbf{N}$, 这些编号可以与特定的含义相关联, 比如, 0—墙体; 1—通道; 2—店铺; 3—上行扶梯入口; 4—上行扶梯出口; 5—下行扶梯入口; 6—下行扶梯出口; 5—直梯; 6—安全通道; 7—步行楼梯等. 每一个栅格都有一个确定的 V 值 v_i .

由定义 1~定义 3 可知, 一个栅格为一个属性对 (s_i, v_i) , 所有栅格构成了楼宇地图 G . 由于在楼层之间并非所有的栅格都是连通的, 所以需要表示出如何从 i 层到达 j 层. 实际上, 楼层之间是由有限的几部楼梯连接起来的, 这在已建好的楼宇中是确定的. 为了便于进行导航运算, 下面给出楼层之间的关系.

定义 4. 设某楼宇楼层之间的关系 $R=\{(G_i, G_j, T_{ij}) \mid G_i \xrightarrow{T_{ij}} G_j, G_i, G_j, T_{ij} \in G, i, j \in M\}$, 其中, G_i, G_j 分别表示同一楼宇的第 i 层和第 j 层的地图, T_{ij} 表示 G_i 到 G_j 通道, 它是一类被特殊标定的栅格, 入口栅格在 G_i , 出口栅格在 G_j , 方向由 G_i 到 G_j , 称 T 为位置传递算子, 其可将平面搜索运算在不同楼层之间传递. 若按定义 3 中的语义表达, 这里的 $V_T=\{3, 4, 5, 6\}$.

由上述定义可知, 完整的楼宇三维空间定义应该是:

定义 5. $G_m=(G, R)$, 其中, G 为不同楼层地图的集合, R 为楼层之间的关系.

例如, 如果一个楼宇 G_m 有两层, 可表达为 $G_m=\{G_1, G_2, T_{12}, T_{21}\}$, 其中, G_1 表示 1 楼, G_2 表示 2 楼, 那么, 行人可以从 G_1 通过 T_{12} 到达 G_2 , 也可以从 G_2 通过 T_{21} 到达 G_1 .

在路径规划中引入启发信息能够提高搜索的效率. A^* 算法是在 Dijkstra 算法基础上发展起来的启发式算法^[4,7,10-12], 通过选择合适的估价函数, 寻找最优路径所使用的搜索空间比经典 Dijkstra 算法少. 设当前选定的栅格编号为 i , 坐标为 (x_i, y_i) , 则下一步搜索栅格是与 i 相邻的 8 个栅格, 其坐标集 $C=\{(x_i, y_i+1), (x_i, y_i-1), (x_i-1, y_i), (x_i+1, y_i), (x_i+1, y_i+1), (x_i+1, y_i-1), (x_i-1, y_i+1), (x_i-1, y_i-1)\}$. $\forall v \in C$, 其估价函数 $f(v)$ 定义为

$$f(v)=g(v)+h(v) \tag{1}$$

其中, $g(v)$ 是起点 s 到 v 的实际费用, 其中向正向 4 个方向(即正上、正下、正左、正右)移动的默认费用为 10, 向斜向 4 个方向(即左上、左下、右上、右下)移动的默认费用为 14; $h(v)$ 是 v 到终点 t 的费用估计函数, 可根据路径规划的标准选取. 本文为了提升运算速度选择了切比雪夫距离, 即 $h(v)=10 \times (|x_r-x_v|+|y_r-y_v|)-6 \times \max\{|x_r-x_v|, |y_r-y_v|\}$. 在搜索最优路径时, A^* 算法优先考虑具有最小 $f(v)$ 值的栅格.

在第 2.1 节中提到了 A^* 算法三维化后所存在的问题, 在此进行简单的分析. 所谓 A^* 算法三维化, 其实就是将 $h(v)$ 三维化, 即 $h(v)=10 \times (|x_r-x_v|+|y_r-y_v|+|z_r-z_v|)-3 \times \max\{|x_r-x_v|, |y_r-y_v|, |z_r-z_v|\}-6 \times \max(\{|x_r-x_v|, |y_r-y_v|, |z_r-z_v|\}-\max\{|x_r-x_v|, |y_r-y_v|, |z_r-z_v|\})$. 考虑楼宇导航的实际需求, 人是不可能沿三维空间行走的, 除非遇到楼梯(且其方向是单一的). 换句话说, 绝大部分的搜索是在平面中进行的, 而由于目的地可能与出发点位于不同的楼层, 估价函数却必须用三维的. 这样做的后果就是很有可能会因楼梯过多, 产生大量的回溯运算, 导致效率大幅降低. 为此, 在同层 PP(path planning) 仍然使用 A^* 算法, 而不同层的 PP 使用动态规划, 本文将这种方法简称为 A -DP.

考虑到楼宇中楼梯的数量及位置是固定的,因此,不同楼层楼梯之间的最佳搭配可以事先求出,以减少在路径规划时的计算量.这样,就可以将楼宇中的路径规划分为 3 个部分:起点 s 到同层楼梯 L , L 到终点同层楼梯 L' , L' 到目的地 t ,如公式(2)所示.

$$d_{\min} = \min\{(s,t,L,L')|d = d_s(s,L) + d_f(L,L') + d_t(L',t)\} \quad (2)$$

其中, $d_s(s,L)$ 为由 s 到 L 的最短路径, $d_t(L',t)$ 为由 L' 到 t 的最短路径. $d_s(s,L)$ 与 $d_t(L',t)$ 均是通过公式(1)求得的. $d_f(L,L')$ 是不同楼层之间的楼梯最佳匹配,是多源最优路径选择,适合采用动态规划求解.此处,要注意 L 的任意性,它不是到 s 最短距离的楼梯(参见第 2.1 节中的分析).当 s 与 t 位于同层时,则不存在楼梯匹配的问题,则式(2)可简化为

$$d_{\min} = d(s,t) \quad (3)$$

式(3)是通过式(1)决定的,即为单纯的 A^* 算法.

以 4 层楼宇为例来剖析 $d_f(L,L')$ 的求解方法.如图 2 所示,假设每层有 4 部楼梯,它们的出、入口不均不相同. En 表示入口,其后数字表示楼层,例如 En_{12} 表示第 1 层第 2 个楼梯入口. Ex 表示出口, Ex_{23} 表示第 2 层第 3 个出口.一对出入口表示两层楼之间转接 T ,如 (En_{12}, Ex_{22}) . 4 层楼宇的位置传送算子集合表示如下: $T = \{T_{12}, T_{23}, T_{34}\}$, 其中, $T_{12} = \{(En_{11}, Ex_{21}), (En_{12}, Ex_{22}), (En_{13}, Ex_{23}), (En_{14}, Ex_{24})\}$, $T_{23} = \{(En_{21}, Ex_{31}), (En_{22}, Ex_{32}), (En_{23}, Ex_{33}), (En_{24}, Ex_{34})\}$, $T_{34} = \{(En_{31}, Ex_{41}), (En_{32}, Ex_{42}), (En_{33}, Ex_{43}), (En_{34}, Ex_{44})\}$. 在图 2 中只标注了上行楼梯,没有标注下行楼梯,如果是安全通道或(电)直梯,则上、下行电梯在相同的栅格,求解一遍即可.扶梯的出、入口是不同的,则下行需要再求一遍.同层楼梯路径是有方向性的,如果出、入口不同,一般是从出口到入口,以便到上/下一楼层.如果出、入口相同,则最优距离为 0.如果某个出口不能到达某个入口,则距离为无穷大.基于这几种情况,同层楼梯之间的 PP 是多源点 PP,但是因为其有方向性,不是任意两点之间的最短路径,因此,用 A^* 算法仍然是非常适合的.动态规划的阶段是按楼层进行划分的,每加入一个楼层为一阶段,它分成如下 3 个步骤:

- (1) 初始化.将每个楼层所有出口到入口最优路径用 A^* 算法求出.
- (2) 计算 i 到 $i+1/i-1$ 层每部楼梯的所有可能的解.
- (3) 比较前判断 $i+1/i-1$ 是否到达顶层/底层,若为否,则继续执行(2);若为是,则结束.

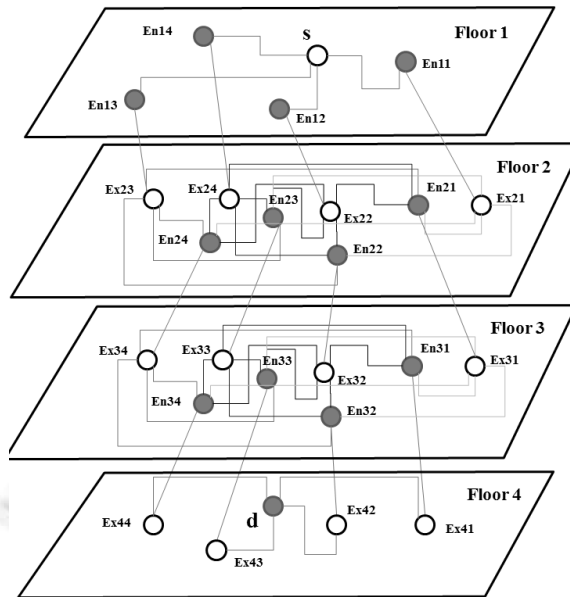


图 2 楼宇楼梯布局示例

任意两层之间的楼梯匹配为 T , 每种匹配的最短距离就是楼梯长度. 3 个楼层的楼梯匹配, 需要经历 2 个 T 和 1 层楼出口到入口的优化选择. n 层的最佳匹配需要经历 $(n-1)$ 个 T 及 $(n-2)$ 层楼的出口到入口的优化选择(其

中, $n>2$).以图 2 所标记的 4 层楼宇为例,其运算过程为:(1) 第 1 层均为楼梯入口,没有最优距离.(2) 由第 2 层任意一个 Ex 出来后,可到达任意一个进入 3 楼的楼梯入口,用 A^* 算法求出 $Ex \rightarrow En$ 所有最优路径,存用 dn 矩阵中,如图 3 所示 $d2$ 为 2 楼矩阵, $d3$ 为 3 楼矩阵.若从 1 楼的 En_{11} 出发到 3 楼,则需要经历 $T_{12}(En_{11}, Ex_{21}), \min\{d_{211}, d_{212}, d_{213}, d_{214}\}$,对应的 3 楼出口,则可以得到一个从 En_{11} 出发到达 3 楼的最佳匹配楼梯($En_{11}, Ex_{21}, En_{2x}, Ex_{31x}$).(3) 需要求出 $Ex \rightarrow En$ 所有最优路径,存用 $d3$ 矩阵中.若从 En_{11} 出发到 4 层确定一个最佳的楼梯口匹配,则不能是简单的 T 值与 d 矩阵的相加,因为从 Ex 出来可到达任意的 En ,需要进行全局行程的比较和决策,如 $D_{311} = \min\{d_{211} + d_{311}, d_{211} + d_{312}, d_{211} + d_{313}, d_{211} + d_{314}\} + C_1$,即需要知道由 Ex_{31} 出来后,到哪个 En_{3x} 最近,其 C_1 表示不同层 T 的累加值.在动态规划的过程中,需要保留 T 、每一层的出入口最优路径 dn ,还需要保留 n 层之间的优化匹配矩阵 $D(n>2)$.

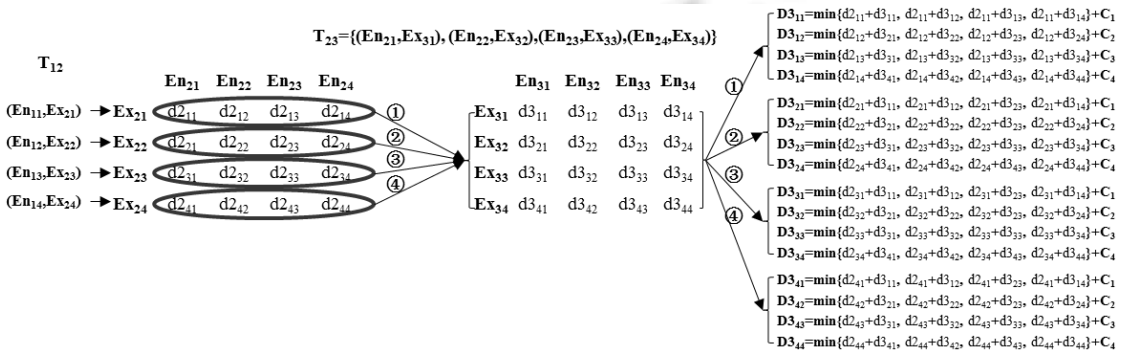


图 3 用动态规划来计算楼梯之间的最佳匹配

这样,就可以得到全部 $d_r(L, L')$ 值.算法伪码如下:

A^* .

输入: G_m .

输出: D .

建立 OPEN 表、CLOSE 表;

将起点放入 OPEN 表;

while (OPEN != NULL)

{ 从 OPEN 表中取估价值 $f(n)$ 最小的节点 n ;

if (n 节点 == 目标节点)

break;

for (当前节点 n 的每个子节点 x)

{ 算 X 的估价值;

if (x 在 OPEN 表)

if (x 的估价值小于 OPEN 表的估价值)

{ 把 n 设置为 x 的父亲;

取最小路径的估价值,更新 OPEN 表中的估价值; }

else if (x 在 CLOSE 表)

continue;

else { 把 n 设置为 x 的父亲;

求 X 的估价值;

并将 X 插入 OPEN 表中; }

}

```

将  $n$  节点插入 CLOSE 表中;
按照估价值将 OPEN 表中的节点进行堆排序;
}
动态规划.
输入: Start, Goal,  $D$ ,  $T$ .
输出: 最优匹配路径矩阵  $D$ , 任意两楼梯间的最小距离矩阵  $T$ .
以假设有  $K$  层楼, 计算所有向上层移动为例:
for ( $i=1$ ;  $i \leq K$ ;  $i++$ )
    for (第  $i$  层楼的所有  $Ex[i][n]$ )
        for (第  $i$  层楼的所有  $En[i][m]$ )
            将  $A^*$  算法算得  $Ex$  与  $En$  的距离存入  $d[i][n][m]$ ;

for ( $i=2$ ;  $i < K$ ;  $i++$ ) // 目前状态: 第  $i$  层
{
    for (此层所有的  $En[i][n]$ )
        for ( $j=i-1$ ;  $j \geq 1$ ;  $j--$ )
            for (第  $j$  层楼的所有  $En[j][m]$ )
                 $\{T[i+1][j][n][m] = \min\{T[i][j][a][m] + d[i][n][a]\}$ ;
            将  $En$  存在取得上式最小结果的  $En(i-1)a$  后}
}

```

3 基于 IMU 的导航技术

IMU 航位推算技术分为 3 部分: 步长估算、脚步探测和方向估算. IMU 结合 A-DP 即可形成较为完整的导航模块, 如图 4 所示. A-DP 给出行走的线路, IMU 模块推算当前的位置, 位置信息可以作为下一次推算的参考, 当严重偏离时, 可能会导致路径的重新规划. A-DP 在第 3 节中已做了详细论述, 下面对 IMU 模块进行讨论.

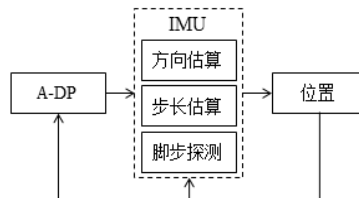


图 4 导航模块构成

3.1 步长估算

步长估计是行人航位推算系统的重要组成部分, 其中, 步长误差是航位推算系统误差的主要来源. 因为步长严重依赖于行人的腿长、行走速度和频率等, 因此不能定义为常量. 常用的方法是对行人的行走行为进行建模, 结合智能采集设备数据, 估计行人步长. 有几种步长估算法较为常用, 但部分算法要求较严格, 因而给测量带来了不便, 影响了它的使用和推广, 如 ZUPT 算法需要将设备绑在腿上等. 这里采用了一种特殊要求较少, 且较为准确的算法, 它是由 Weinbergt 等人^[22]提出来的基于行人行走共性的经验模型:

$$S = \sqrt[4]{A_{\max} - A_{\min}} \times K \quad (4)$$

其中, A_{\min} 是一步之内沿 z 轴最小的加速度; A_{\max} 是一步之内沿 z 轴的最大加速度; K 是一个单位转换常量.

3.2 脚步探测

对步长的测量通常依赖于基础数据处理技术(过滤、级次、局部方差和阈值).多数文献使用陀螺仪或加速计^[23].由于陀螺仪在进行脚步探测时存在一定的误差累积,所以本文使用基于加速计的 batch-mode 算法,它分为以下 4 个步骤:

(1) 计算三轴加速计的合加速度:

$$a_i = \sqrt{a_{x_i}^2 + a_{y_i}^2 + a_{z_i}^2} \quad (5)$$

(2) 为消除重力的影响并突出行走过程中的加速度变化,用公式(6)计算加速度局部方差:

$$\sigma_{a_i}^2 = \frac{1}{2\omega+1} \sum_{j=i-\omega}^{i+\omega} (a_j - \bar{a}_j)^2 \quad (6)$$

其中, \bar{a}_j 是局部加速度均值,计算公式 $\bar{a}_j = \frac{1}{2\omega+1} \sum_{q=j-\omega}^{j+\omega} a_q$, ω 是数据采集窗口平均大小,与采集频率相关,实验中取 15.

(3) 阈值.在行人行走过程中, σ_{a_i} 呈现高、低两个交替的状态变化,每完成一次交替,即完成一次行走过程.因此,设定两个阈值.第 1 个阈值被用于检测高加速度的摆动($T_1=2\text{m/s}^2$).

$$B_{1_i} = \begin{cases} T_1, & \sigma_{a_i} > T_1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

第 2 个阈值($T_2=1\text{m/s}^2$)被用来检测起步相 ($B_{2_i} = T_2$, if $\sigma_{a_i} < T_2$).

(4) 在第 i 步测试中,当一个摆动期结束,下一步启动时,一个步子被检测出来.有两个条件必须满足:1) 由高到低的加速度转换 ($B_{1_{i-1}} < B_{1_i}$);2) 在当前测试第 i 步之前,在一个检测窗内至少有一个低加速度被检测到,例如, $\max(B_{2_i} : i + \omega) = T_2$.

3.3 方向估算

在行人航位推算系统中,陀螺仪、磁力计和加速计都可以用于获取行人的行走方向.陀螺仪能够较为准确地测量运动物体的角速度且测量结果不易受周围环境影响,能够测量运动物体的相对方向,具有短时精确性.但是由于角速度存在误差,由角速度积分得到的方向会随着时间的增长而不断发散,如果没有校正过程,则得到的方向并不可靠.磁力计是通过感应地磁场的变化来确定运动物体的绝对方向,其误差不会随时间发散,但是由于地磁场容易受周围金属物体和电磁干扰的影响,磁力计得到的方向会产生不可预知的偏差.考虑室内导航会存在很多障碍物、走廊等,方向的偏差可能会导致行人“进入墙内”或走入非导航路径上的走廊中,为了避免这种情况的发生,本文采用了陀螺仪、磁力计与地图中的最优化路径相结合的算法——改进 HDE 算法(stride & path & magnetic heuristic drift elimination,简称 SPM-HDE)来进行纠正.由于陀螺仪会随着行人的走动产生一个漂移误差 ε ,依据 HDE 算法,基于陀螺仪 z 轴方向的每一步角速度计算公式为

$$\omega_{\text{raw}} = \omega_{\text{true}} + \varepsilon_0 + \varepsilon_d \quad (8)$$

其中, ω_{raw} 是从陀螺仪直接输出的角速度, ω_{true} 是真实未知角速度, ε_0 是静态漂移量,指站住之前的误差; ε_d 未知的缓慢改变的漂移量. ε_0 可由陀螺仪数据直接测出,则在行走期间, ε_0 可从 ω_{raw} 中减去:

$$\omega_{\text{meas}} = \omega_{\text{raw}} - \varepsilon_0 = \varepsilon_{\text{true}} + \varepsilon_d \quad (9)$$

于是,导航角度可以通过下式计算:

$$\psi_i = \psi_{i-1} + \omega_{\text{meas},i} T_i \quad (10)$$

其中, ψ_i , ψ_{i-1} 表示在行走过程中行至第 i 步和第 $i-1$ 步的导航角度, $\omega_{\text{meas},i}$ 表示除去静态漂移偏差的角速度, T_i 是两步间隔时间.在公式(10)中,含有漂移量 ε_d ,并且会累积,因此,本文用下列改进的 HDE 进行修正,形成 SPM-HDE,并用它组成反馈控制系统,如图 5 所示.它的执行过程如下:

(1) 当行人走在直线路径时, $\omega_{\text{true}}=0$,此时陀螺仪的输出为 ε_d . ε_d 与二元控制器 I-Controller 的输出 I_i (初始情况下 $I_i=0$),相加得 $\varepsilon_d + I_i$,此值被送往数值积分器,得到积分结果 ψ'_i , ψ'_i 被送到修正控制器 W-Controller 中,计算

$r=s \times \sin \psi'_i$,若 $r>d$ (行人到墙的距离),偏差到墙里,是错误的,所以沿用上一次的角度 ψ_{i-1} ;否则,修改到墙的距离, $d=d-r$,加上磁力计的方向判断其是否转弯了.如果磁力计方向改变,且不是规定的路径,说明是行人走错路径,提示行人并改正线路,继续沿用 ψ_{i-1} ;经过 W-Controller 修正后,得到结果 ψ_i .

(2) 在第 1 次迭代之后,反馈控制系统形成回路,并将 ψ_i 处理得到 ψ_{i-1} .一方面发送 W-Controller 做下一次修正使用,另一方面,发送给 MOD 函数. Z^{-1} 是反馈控制的常用定义,表示延迟一个采样间隔.

(3) 当行人沿某一方向直行时,需要对陀螺仪漂移的方向进行判断,即相对于主方向 ψ 偏左还偏右.用 $\psi^*=\text{MOD}(\psi, \Delta)$,将 ψ^* 值限定在 $(0, \Delta)$ 之间.判断 $E_i=\Delta/2-\psi^*$,若小于 0,则在 ψ 右偏时,补偿一个很小的角速度 $-i_c$,若大于 0,则 ψ 左偏,补偿 $+i_c$.补偿过程是在二元控制器 I-Controller 中进行的,补偿公式为

$$I_i=I_{i-1}-\text{SIGN}(\psi^*_{i-1}-\Delta/2) \times i_c \tag{11}$$

其中, $\text{SIGN}(x)$ 为符号函数: $x>0$,返回 1; $x=0$,返回 0; $x<0$,返回 -1.则更正后的角速度为

$$\omega_i=\omega_{\text{meas}, i}+I_i \tag{12}$$

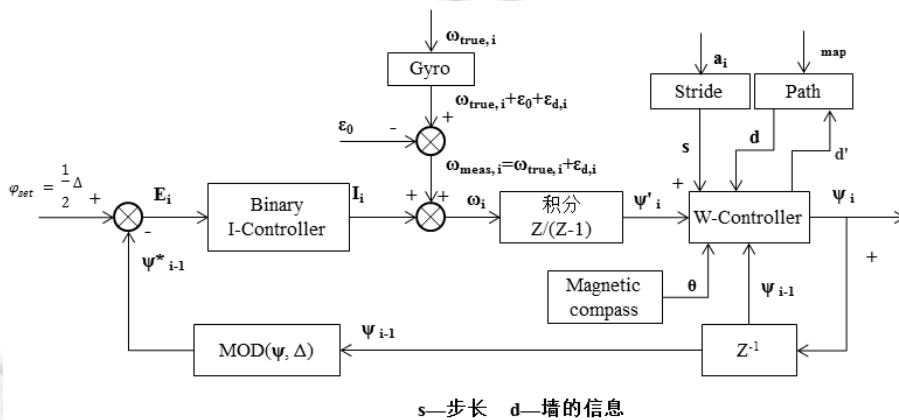


图 5 SPM-HDE 反馈控制系统

4 实验及结果分析

实验用的设备为若干台带有加速计、磁力计和陀螺仪的智能手机.实验环境为大型商场,分别对路径规划、步长及导航进行了测定,下面是得到的实验结果及相关分析.

4.1 路径规划

本文选择两种类型的商场进行测试,每个栅格面积: $0.5 \times 0.5 \text{m}^2$,其他参数见表 1.分别用动态规划、Dijkstra、A-DP 进行测试,内容包括经过的栅格数和所用的时间,分 5 组测试,选择不同起点和终点,每组测试 3 遍(经过的栅格基本相似,主要考察时间属性,取 3 次时间的均值),结果见表 2.

当选择远离楼梯口的起始点时,DP 并不比 Dijkstra 更快,如第 2 组测试结果;而靠近楼梯口时,DP 比 Dijkstra 快些,因为 DP 在选择栅格时做了优化,后一阶段不再考虑前一阶段的“劣质”栅格.而 A-DP 比 DP 和 Dijkstra 明显快出很多,尤其是在障碍物较少的路径中,这主要是因为 A-DP 在每一步都选择离目标点最近栅格.6 层商场的规划速度不一定比 4 层慢,这与楼梯总数、楼梯之间的距离等相关.

Table 1 Parameters of the two shopping centers

表 1 商场地图参数

层数	总面积(m^2)	栅格总数(个)	可穿行栅格数(个)	安全通道(部)	直梯(部)	扶梯(部)	电梯总数(部)
4	150×50×4	120 000	28 800	2	2	2	6
6	6×270×102	660 960	177 000	6	4	6	16

Table 2 Indoor navigation algorithm in three-dimensional space expense

表 2 室内三维空间中导航算法用度

建筑	算法/组别	测试组 1		测试组 2		测试组 3		测试组 4		测试组 5	
		栅格(块)	时间(ms)	栅格(块)	时间(ms)	栅格(块)	时间(ms)	栅格(块)	时间(ms)	栅格(块)	时间(ms)
4 层(28 800)	DP	23 951	7 952	26 677	10 749	24 161	7 891	19 310	6 223	7 201	5 643
	Dijkstra	26 072	8 563	27 136	10 582	25 682	8 263	23 004	8 013	10 932	7 952
	A-DP	7 153	3 572	8 959	3 859	6 860	3 244	6 912	4 024	5 056	3 694
6 层(177 000)	DP	58 732	15 936	93 201	25 438	102 132	26 319	136 937	47 392	121 319	34 032
	Dijkstra	87 362	24 674	114 720	30 762	124 389	33 462	159 980	60 716	143 568	42 256
	A-DP	33 497	9 847	59 825	19 884	55 411	17 363	88 721	29 337	79 762	21 365

4.2 步长测试结果

本节分别对 ZUPTs,INS-EKF-ZUPT,Weinberg 和 Kim 所提出的步长测试方法进行了测试.4 种方法实现后以不同的服务安装于同一手机上,尽量保证测试环境相同,采用多次测试取均值的方法,增加随机性,贴近自然行走,排除可能出现的偶然性,使所得出的数据真实、可靠,并具有可比性,具体为

$$\bar{s}_k = \left(\sum_{i=1}^n S_{i,k} \right) / n \tag{13}$$

其中, \bar{s}_k 表示第 k 步的步长均值, $S_{i,k}$ 表示第 i 次第 k 步的步长, n 表示总的测试次数.取 $k=150, n=10$, 测试结果如图 6 所示.结果显示,Weinberg 的方法更稳定一些,且接近平均值.所以,本文采用 Weinberg 提出的方法.但要注意的是,步长与人的身高、腿长、运动习惯等均有一定的关系,所以,不同的人在使用本模块时都要先进行训练,而且要进行积累,随着使用次数的增多, \bar{s}_k 会越来越准确的.

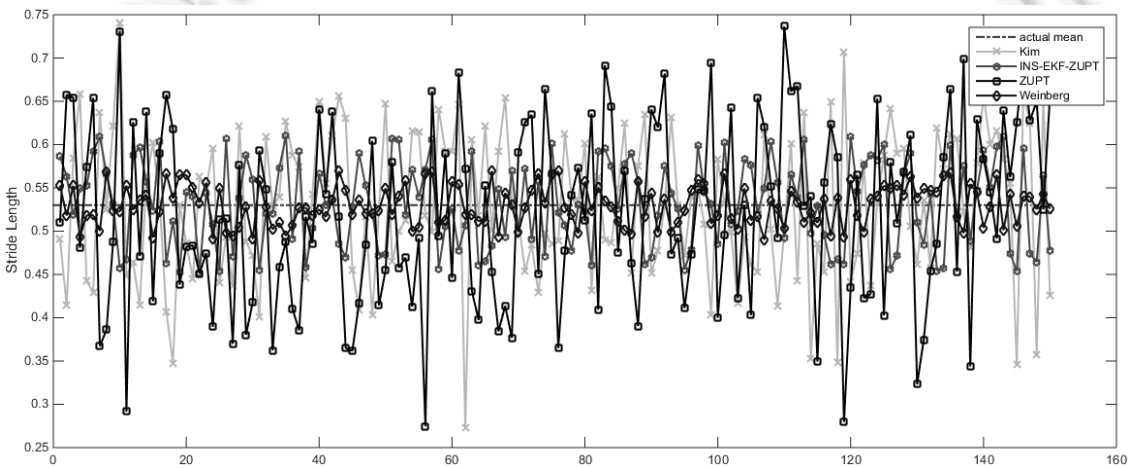


图 6 步长测试结果

4.3 导航测试

对表 1 中所列的两类商场进行了多次测试,得到了基本相同的测试结果.现以 4 个楼层商场测试结果为例进行分析.如图 7 所示,为该商场的平面图.从 1 层的 S 处出发,到达 4 层的 E 处.经过 A-DP 算法计算后,可得最优路径 $S \rightarrow En_{12} \rightarrow Ex_{22} \rightarrow Ex_{32} \rightarrow En_{34} \rightarrow Ex_{44} \rightarrow G$, 其中,1 层~3 层为直达电梯,如图 7 中所示的深黑实线,图中阴影覆盖区为容错区,即在该区域内行走均为合法,可以用于修正行走过程中可能产生的误差.由图 7 可以看出,未经修正的 Cyro 和 HDE 经常有穿墙行为,如图 7 中 1 层和 2 层所示;仅用陀螺仪 Cyro 存在误差积累,因此偏差比较大,1、3、4 层均可以明显看出;A-DP+Magnetometer 导航比较准确,但在 3 层时受到金属磁体的影响而出现较大的偏差;A-DP+HDE+Magnetometer 因存在各种修正,而未出现较大偏差,导航比较准确.

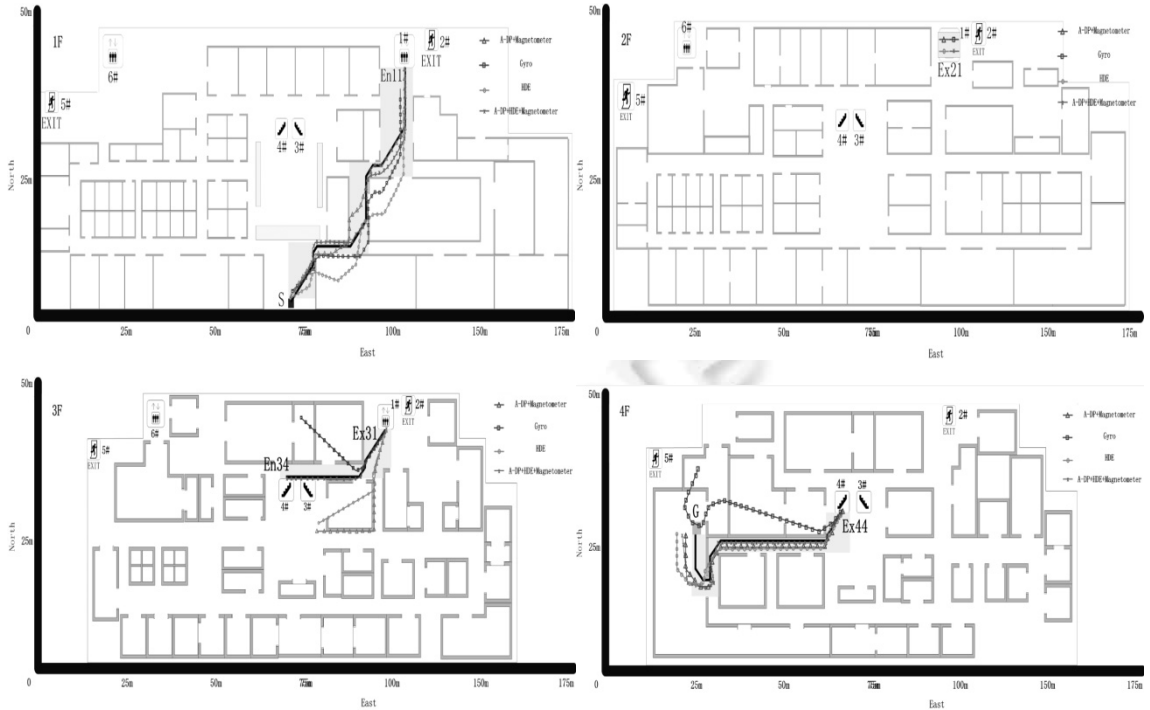


图 7 基于 IMU 室内导航轨迹比较

5 结束语

针对室内导航精度不准、线路规划困难等问题,本文先是采用切片、重组栅格地图建模方式定义了三维楼宇室内地图的绘制方法,与矢量图或经纬度地图相比,地图构建容易,信息描述准确,在转化平面建筑图或设计图时,无需经纬度匹配或矢量坐标的计算,同时,降低了算法对地图解析的难度,减少了地图结构带来的冗余信息,提高了路径规划和导航算法的运行效率.随后提出一种启发式动态规划算法 A -DP,完成三维室内最优路径的搜索,在其约束下,改进 HDE 算法成为 SPM-HDE 算法,使方向定位更加准确,与其他 IMU 的导航技术相结合,完成室内导航.经测试, A -DP 算法优于 Dijkstra 算法,SPM-HDE 方向定位较为准确,在最终实现的系统中,航位推算与导航模块达到了预期的目标.然而,在地图绘制过程中也反映出,对于非常庞大的建筑群而言,切片重组的工作量也是巨大的,在今后的工作中会继续探索将矢量图或经纬度地图与栅格地图相结合的建模方式,并对现有算法进行优化,全面提高系统的应用效率.

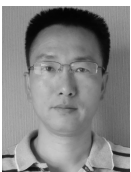
References:

- [1] Clifton C, Leavens GT, Chambers C, Millstein T. MultiJava: Modular open classes and symmetric multiple dispatch for Java. ACM SIGPLAN Notices, 2000,35(10):130-145.
- [2] Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik, 1959,1(1):269-271.
- [3] Zhan FB. Three fastest shortest path algorithms on real road networks: Data structures and procedures. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 1997,1(1):69-82.
- [4] Ahuja RK, Mehlhorn K, Orlin JB, Tarjan RE. Faster algorithms for the shortest path problem. Journal of the Association for Computing Machinery, 1990,37(2):213-223.
- [5] Gen M, Cheng R, Wang D. Genetic algorithms for solving shortest path problems. In: Proc. of IEEE Int'l Conf. on Evolutionary Computation. IEEE, 1997. 401-406. [doi:10.1109/ICEC.1997.592343]
- [6] Begum M, Mann GKI, Gosine RG. Integrated fuzzy logic and genetic algorithmic approach for simultaneous localization and mapping of mobile robots. Applied Soft Computing, 2008,8(1):150-165.

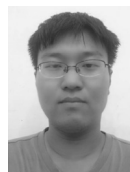
- [7] Lester P. *A** pathfinding for beginners. 2005. <http://www.policyalmanac.org/games/aStarTutorial.htm>
- [8] Niu JW, Liu Y, Lu BH, Song WF. An in-building localization algorithm based on Wi-Fi signal fingerprint. *Journal of Computer Research and Development*, 2013,50(3):568–577 (in Chinese with English abstract).
- [9] Zhu J, Zhao H, Xu JQ, Li DZ. Localization model in wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2011,22(7):1612–1625 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3836.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03836]
- [10] Peng F, Liu ZK, Zhang QS. Quick path planning algorithm in the vehicle positioning and navigation system. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002,28(1):70–73 (in Chinese with English abstract).
- [11] Trovato KI, Dorst L. Differential *A**. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2002,14(6):1218–1229. [doi:10.1109/TKDE.2002.1047763]
- [12] Wang WH, Ma Y, Xie Y, Guo M. Mobile robot optimal path planning based on smoothing *A** algorithm. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010,38(11):1647–1655 (in Chinese with English abstract).
- [13] Foxlin E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors. *Computer Graphics and Applications*, 2005,25(6):38–46. [doi: 10.1109/MCG.2005.140]
- [14] Jiménez AR, Seco F, Prieto JC, Guevara J. Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for Yaw drift reduction and a foot-mounted IMU. In: *Proc. of 2010 the 7th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC 2010)*. IEEE, 2010. 135–143. [doi:10.1109/WPNC.2010.5649300]
- [15] Beauregard S. A helmet-mounted pedestrian dead reckoning system. In: *Proc. of 2006 the 3rd Int'l Forum on Applied Wearable Computing (IFAWC 2006)*. VDE, 2006. 1–11.
- [16] Kim JW, Jang HJ, Hwang D H, Park C. A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system. *Journal of Global Positioning Systems*, 2004,3(1):273–279.
- [17] Borenstein J, Ojeda L. Heuristic drift elimination for personnel tracking systems. *Journal of Navigation*, 2010,63(4):591–606.
- [18] Abdulrahim K, Hide C, Moore T, Hill C. Integrating low cost IMU with building heading in indoor pedestrian navigation. *Journal of Global Positioning Systems*, 2011,10(1):30–38.
- [19] Aggarwal P, Thomas D, Ojeda L, Borenstein J. Map matching and heuristic elimination of gyro drift for personal navigation systems in GPS-denied conditions. *Measurement Science and Technology*, 2011,22(2):025205.
- [20] Nam Y. Map-Based indoor people localization using an inertial measurement unit. *Journal of Information Science and Engineering*, 2011,27(4):1233–1248.
- [21] Rai A, Chintalapudi KK, Padmanabhan VN. Zee: Zero-Effort crowdsourcing for indoor localization. In: *Proc. of the 18th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2012)*. ACM, 2012. 293–304. [doi: 10.1145/2348543.2348580]
- [22] Weinberg H. Using the ADXL202 in pedometer and personal navigation applications. Technical Report, MA-02062-9106, Norwood, 2002. <http://www.bdtic.com/Download/ADI/AN-602.pdf>
- [23] Feliz AR, Zalama CE, Gómez GBJ. Pedestrian tracking using inertial sensors. *Journal of Physical Agents*, 2009,3(1):35–43.

附中文参考文献:

- [8] 牛建伟,刘洋,卢邦辉,宋文芳.一种基于 Wi-Fi 信号指纹的楼宇内定位算法. *计算机研究与发展*,2013,50(3):568–577.
- [9] 朱剑,赵海,徐久强,李大舟.无线传感器网络中的定位模型. *软件学报*,2011,22(7):1612–1625. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3836.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03836]
- [10] 彭飞,柳重堪,张其善.车辆定位与导航系统中的快速路径规划算法. *北京航空航天大学学报*,2002,28(1):70–73.
- [12] 王红卫,马勇,谢勇,郭敏.基于平滑 *A** 算法的移动机器人路径规划. *同济大学学报*,2010,38(11):1647–1655.



张小东(1971—),男,河北赞皇人,博士生,讲师,CCF 学生会员,主要研究领域为云计算,移动计算,虚拟企业集成,电子商务.



王宇辰(1994—),男,本科生,主要研究领域为移动计算,嵌入式系统,智能计算.



战德臣(1971—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为现代企业管理,数据与知识工程,软件体系结构与软件重用,虚拟企业集成与电子商务,企业资源计划,现代集成制造系统.



屈锦春(1993—),男,硕士生,主要研究领域为移动计算,嵌入式系统,智能计算.