基于激光测距的未知环境建图智能系统

T.H.M.N.C. Thelasingha[1], U.V.B.L. Udugama[2], E.M.S.P. Ekanayake[3], G.M.R.I. Godaliyadda[4], M.P.B. Ekanayake[5], B.G.L.T. Samaranayake[6],J.V. Wijayakulasooriya[7]

摘要：自主系统被应用于许多无法供人类进入的区域，例如未知地形建图、侦察、勘探等。它们需要一种准确且切实可行的智能导航系统（INS），能够应对环境的复杂性，并适用于移动平台的实际部署。此外，无误差定位方法也是实现此类系统的一项主要要求。本文概述了一种系统的实现方案，该系统足够简单，可部署于移动平台，重点是提供一种逻辑清晰且计算效率高的算法，并以激光测距仪（LRF）的测量值作为输入。与存在串扰和镜面反射等误差的超声波传感器以及耗电量较大的视觉系统相比，使用LRF进行建图是当前热门的研究领域。由于反射率问题，LRF读数也会包含一些噪声，因此开发了测量值预处理方法。智能导航系统会智能地分析数据频谱，以确定应当通过的无障碍路径，从而使移动平台能够遍历整个环境并构建地图。此外，定位方法通过相似变换和粒子滤波器实现。概念设计使用Python™ 在Windows™ 上进行了仿真，并在人工生成的环境中测试了其稳健性。随后，使用Python™ 对系统进行模拟，并实时输入由LRF采集的真实环境数据。之后，该系统在嵌入式系统层面部署于一台搭载在3WD全向移动平台上的Raspberry pi3™ ，并在真实环境中进行了测试。此外，独立运行的定位算法还用于修正生成的地图和平台的位置。该系统能够准确生成所在区域的完整二维地图。通过对执行时间进行比较分析，本文对所提方法进行了定量论证。

关键词： 智能导航、激光雷达、自主建图、蒙特卡洛同步定位与建图

1. 引言

环境地图构建一直是太空探索、挖掘、灾害救援和侦察应用等领域的关键因素。因此，在人类无法进入的区域执行此类任务时，高度自动化至关重要。多年来，许多研究都致力于解决自主构建未知环境地图这一工程问题[1] [2] 。要使其取得成功，还需在多个方面进行开发。

首先，必须采用一种正确的感知方法来感知环境的几何结构。许多已发表的研究都使用了雷达 [3], 声呐 [4],视觉系统和激光测距仪（LRF）[5]。像声呐这类方法适用于简单的距离感知，但若用于建图等应用，则会产生大量噪声。尽管视觉传感器能够提供更准确、更生动的环境数据，但所需的计算能力会使其不太适合在移动平台上实现。在本研究中，采用了一种低成本激光测距仪

T.H.M.N.C. Thelasingha 先生，斯里兰卡佩拉德尼亚大学电气与电子工程系理学学士工程本科生 ***U.V.B.L. Udugama*** 先生，斯里兰卡佩拉德尼亚大学电气与电子工程系理学学士工程本科生***E.M.S.P. Ekanayake*** 女士，斯里兰卡佩拉德尼亚大学电气与电子工程系理学学士工程本科生工程师（博士） ***M.P.B. Ekanayake***，理学学士工程（佩拉德尼亚），哲学博士（德克萨斯理工大学，美国），*AMIE*（斯里兰卡），斯里兰卡佩拉德尼亚大学电气与电子工程系高级讲师工程师（博士）***G.M.R.I. Godaliyadda***，理学学士工程（佩拉德尼亚），哲学博士（新加坡国立大学，新加坡），*AMIE*（斯里兰卡），斯里兰卡佩拉德尼亚大学电气与电子工程系高级讲师工程师（博士）***B. G. L. T. Samaranayake***，佩拉德尼亚理学学士工程、瑞典皇家理工学院技术执照及哲学博士，电气与电子工程师学会高级会员，*AMIE*（斯里兰卡），斯里兰卡佩拉德尼亚大学电气与电子工程系高级讲师工程师（博士）***J.V. Wijayakulasooriya***，理学学士工程（佩拉德尼亚），哲学博士（诺森比亚大学，英国），*MIE*（斯里兰卡），斯里兰卡佩拉德尼亚大学电气与电子工程系高级讲师

[6] 已被用作距离传感器。像微软 Kinect 这样的高端传感器™ 能够提供更加精确的数据，但为了使实现切实可行，选用了一个简单的传感器。

另一个主要问题是如何穿越未知区域。移动机器人和四旋翼飞行器等多种方案[7] 都是可行的解决方案。但考虑到定位和机动性的准确性与便利性，本研究采用全向三轮全向移动平台 [8] 作为建图智能体。该平台完全由本团队自主研发。由于其全向特性，该平台能够在任意方向瞬时移动，加之尺寸适宜，因此可以有效穿越许多复杂环境。研究中实现了状态反馈线性化非线性控制器，使该平台能够自行调整至给定的参考坐标和方向。

此外，还选用了便捷的传感器，并开发了一种运动方法。大多数方案缺乏正确的导航系统 [1] ，无法引导智能体穿过环境中的障碍物，从而遍历整个区域。障碍物检测[9] 和可通行空间识别方法 [10] 已经开发完成。此外，用于寻找最小代价路径的算法[11]也已经开发了一段时间。

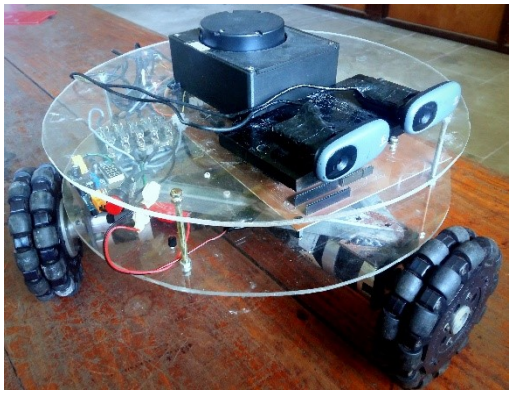

图 1 – 实际实现

但是，需要采用一种方法来智能分析距离测量数据，并决定要探索的方向。因此，我们开发了一种独立的导航算法，用于分析传感器提供的信息，并确定移动平台应采取的路径，从而生成区域的完整二维叠加图。

此处，为构建地图，移动平台在导航算法的引导下穿越该区域。同时，还将计算其当前位置和方向，并将其反馈给导航系统，以确定下一时刻应行进的方向。但测量值和驱动中始终可能存在误差。此外，基于编码器的位置容易因车轮打滑和数据传输误差而产生误差。因此，为实现准确定位并对由激光测距仪生成的地图数据进行校正，还开发了一种基于蒙特卡洛方法的独立运行的同步定位与建图（SLAM）[12] 算法。该算法利用智能体沿其轨迹移动时短时间帧内的激光测距扫描，实时校正基于编码器的位置估计。

上述三个方面的综合实现，即硬件配置（全向移动平台和激光测距仪）、导航与路径规划算法以及同步定位与地图构建算法，成功实现了对未知障碍物密布环境的二维叠加图生成。若要将二维地图扩展为完整的三维地图，集成视觉系统将是有效的方法。后续研究将探索这种组合。

2. 硬件实现

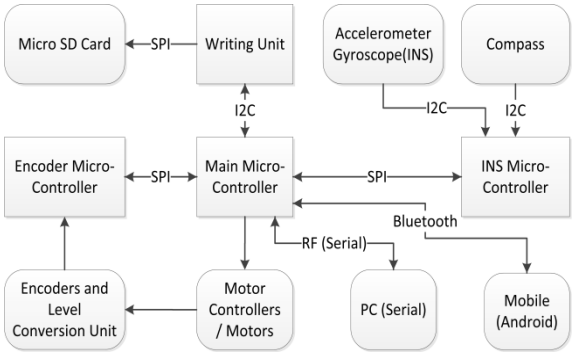

图 2 – 完整的嵌入式系统架构

2.1 全向移动平台

全向移动平台是本研究得以实现的实际载体。该平台完全由团队自主设计和构建。我们开发了独立的嵌入式系统架构，以便在通用微控制器上实现控制算法和传感器融合算法。此外，系统的电子设备

包括电机控制电子设备和其他辅助系统，均与传感器模块集成在一块单板上。

需要指出的是，此处未使用全球定位系统（GPS），因为该设备面向勘探和挖掘等场景开发，而这些场景无法保证始终能够使用 GPS。通过融合三个用于检测方向的不同传感器的数据，可以准确估计建图智能体的位姿（位姿或状态）。所用传感器包括：陀螺仪（MPU6050）、罗盘（HMC5883L）以及安装在车轮上的光学轴编码器（OSE）（型号：E50050030）。为融合上述传感器的数据，我们在通用微控制器上实现了集中式卡尔曼滤波器（CKF）。由于里程测量系统与惯性测量单元和罗盘相结合，因此即使系统在打滑和颠簸运动等不同运动条件下移动，位置估计的精度也得到了显著提高。作为控制器策略，我们在主微控制器上实现了非线性状态线性化控制器，从而使 ODR平台能够沿任意给定轨迹行进，同时遵循给定的方向曲线。

2.2 激光测距仪（LRF）数据处理

所使用的激光测距仪配备了由 Xv-11激光雷达控制器[6] 驱动的 Neato激光传感器。与市场上的其他测距仪相比，这款激光测距仪价格低廉、广受欢迎，并已用于许多研究和实验应用。尽管其精度要高得多

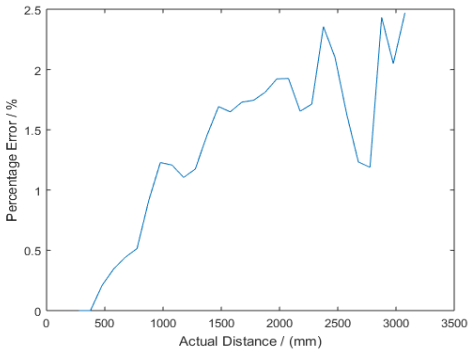

图3 – 激光测距仪的误差特性

与声呐或简单视觉系统相比，虽然性能更高，但测得的距离仍存在一定偏差。激光测距仪的误差特性如图 3 所示。

激光传感器通过向周围发射一串激光脉冲，并测量脉冲反射返回所需的时间来工作。根据传感器测得的飞行时间，可以准确计算出到反射点的距离（精确至 1 毫米）。随后，传感器将距离数据编码成数据包，并发送给激光雷达控制器。控制器对数据包进行解码，再通过串行端口将数据传送至主机设备。主机设备即部署智能导航系统（INS）的嵌入式系统。由于百分比误差较小，在距离小于 3 米时，激光测距仪的测量值可用于准确估算距离。为减小激光测距仪测量数据中的噪声，研究人员开发了一种独立的方法。噪声大多由物体表面的反射率效应以及激光测距仪旋转速度的变化造成。为避免数据点重叠和角度测量错误，XV激光雷达控制器中采用了 PID控制器，将传感器的旋转速度调节至最佳速度 200 rpm；在该速度下，设备每旋转一度即可发送一个距离数据点。通过多次采样，许多反射率失真都可以得到校正。这里采样次数约为五次，同时兼顾了运行速度和功耗。

系统的一项主要设计能力是具备通用性，并能动态适应任何移动平台。因此，在扫描步骤中，激光测距仪仅在扫描时通电，其余时间均断电，从而在移动平台应用中降低功耗。

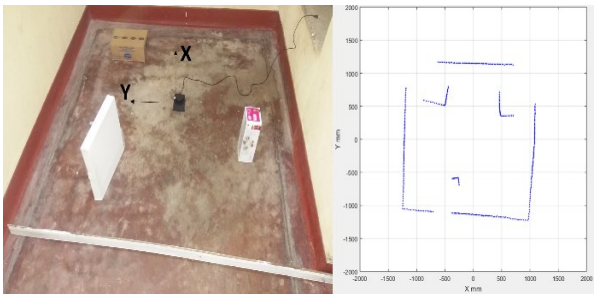

图4 – 360º的激光测距仪极坐标扫描

3. 智能导航系统

智能导航系统（INS）是分析传感器数据并引导移动平台前往必要地点进行探索的实体 [17]。INS 曾

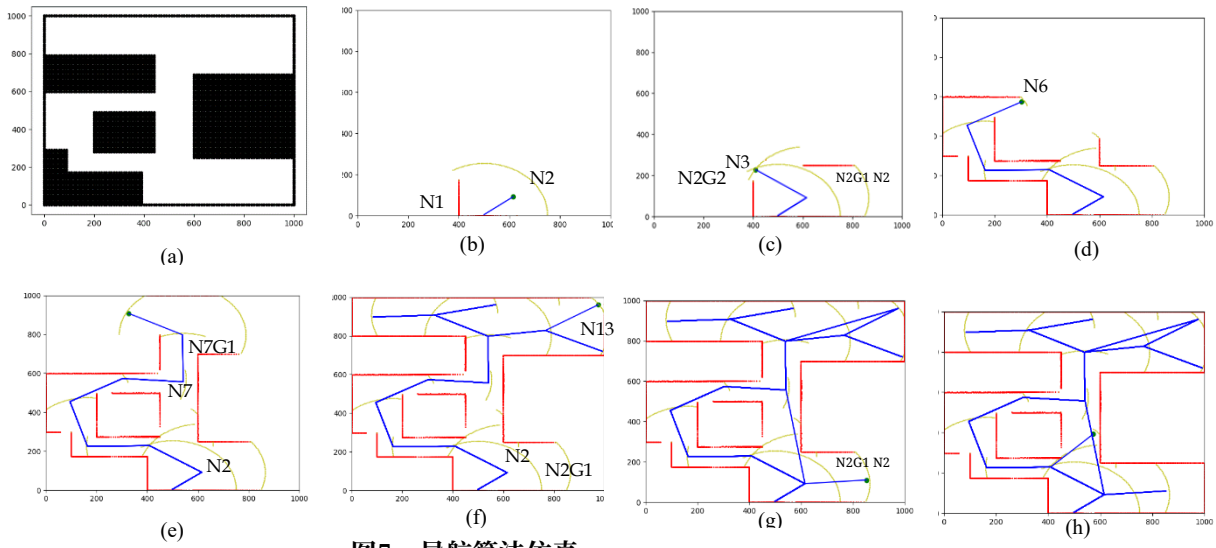

图5 – 导航算法仿真

在图5(a)所示的仿真环境中运行，结果按照图5(b)至图 5(h)所示的步骤生成。需要注意的是，激光扫描所经过的锚点称为“节点”，而智能体可以在这些节点之间往返移动的相邻节点则称为“邻居”。智能导航系统的工作流程可通过以下步骤进行分析，

1) 步骤 01：初始化所有存储类和数据结构，并读取当前位置和方向。在当前位置创建一个节点，即图5(b)中标记为 N1 的节点。（如果这不是第一个节点，则将新节点添加为前一个节点的邻居，反之亦然。）首先进行 360° 扫描，因为智能体必须先定位并决定要探索的方向。激光测距仪会获取每度对应的距离数据列表。

2) 步骤 02：接下来应正确识别间隙和墙壁。将相对于智能体的距离大于给定长度的数据点选为间隙点，因为这些位置可被视为有望发现环境新信息的区域。分析距离数据，将其分类为墙壁或间隙。每次分类完成后，计算其属性（宽度和质心）。在此示例中，从 N1 处的扫描结果检测到一个较大的间隙，因此引导智能体朝向该间隙的质心。随后在节点 N2 处再次扫描，并检测到两个间隙。如图5(c)所示，智能体首先被引导至最小宽度间隙，即 N2G2。本文后文将说明此方法的合理性。这里应注意

第一次扫描后，扫描会偏向前方进行。这是一次围绕智能体航向的 300° 扫描±150° 。如图5(d)所示，智能体现在已行进至节点 N6，并进一步抵达图5(e)中的节点 N7。

3) 步骤 03：可以看出，从 N2 直接行进至 N7 是可行的。因此，这两个节点应当互为邻居。此外，可以注意到，无需从 N7 向下朝 N2 扫描，因为这些节点之间的整个环境已通过在相应节点处进行的扫描完成地图绘制。因此，为了处理这类情况，需要单独进行“邻居识别”，具体如下：

A.) 如果任意两个节点之间的距离小于扫描范围的两倍，则可以认为这两个节点之间的整个区域都已探索。因此会出现上述情况。

B.) 检查相应两个节点之间的每个间隙，确认其是否与连接这两个节点的直线相交。由于这些间隙位于已知节点之间，内部没有新的未探索数据，因此将其设为已探索间隙。

C.) 此外，如果这些间隙的宽度大于智能体的尺寸，智能体便可以通过。因此，相应的节点被视为彼此的邻居（即可以在节点之间通行）。

经过上述分析，智能体现在被引导前往 N7G1，因为这是地图中缺少信息的区域。但智能导航系统现在已经获知，从 N7 到 N2 有一条可用路径，无需在两者之间行进或探索任何间隙。系统通过持续更新从每个节点到当前节点的行进代价地图来记录这一信息。系统会计算从当前节点到各节点的行进代价（距离）

该计算会经过相邻节点。系统会选择代价最低的未探索节点，并分析其对应间隙，找出其中最窄的未探索间隙。但该间隙必须足够宽，才能通行。显然，代价最低的未探索节点就是智能体当前所在的节点。但如果该节点没有任何未探索间隙，就意味着这是一个死胡同。此时，智能导航系统会智能地决定前往代价最低的节点，而不是单纯回溯以寻找未探索间隙。（这种代价最低节点优先的方法是第一种方法；下一节将论证优先选择最窄间隙的方法。）

4) 步骤 04：在下一步中，如图 5(f) 所示，智能体探索完地图上部后到达节点 N13。根据步骤 03 中说明的流程，它决定返回尚未探索的节点 N2，即间隙 N2G1。截至目前，智能导航系统已知从 N7 到 N2 的路径，因此不会进行不必要的回溯，而是穿过环境中部前往节点 N2，如图 5(g) 所示。系统采用 Dijkstra 最短路径算法 [11]，找到通往所选节点的最小代价路径。随后生成供智能体遵循的行进参考点。探索完节点 N2 后，智能体会继续探索 N3 处另一个尚未探索的间隙，并如图 5(h) 所示完成建图

该算法经过实现，使用的外部复杂库数量尽可能少。此外，我们尽可能避免程序循环，并对函数进行优化，使其执行速度更快。我们使用条件开关来处理由数据依赖导致的误差。由于所需处理能力较低，且使用了简单的函数和库，因此该系统更适合在资源有限的移动平台上实现。

4. 绘图效率的改进

评估建图效果时，有两个关键因素：地图精度以及完成整个区域建图所需的时间。地图精度在很大程度上取决于激光测距仪测量数据的精度，以及相对于区域对当前位置的正确估计。智能体采用的控制策略将决定平台能否准确定位到智能导航系统指示的坐标。因此，为了正确定位智能体，

采用了一种专用的同步定位与建图算法。该算法利用激光测距仪的数据，计算对智能体位置和生成地图所需的修正量。

除了上述方法外，智能导航系统还采用了几种逻辑来缩短建图时间。其中一种是扫描方法。智能体首次扫描环境时，会以 360° 进行整圆扫描，使其能够定位自身，并正确决定首先探索何处。但在初始化之后进行的扫描，会围绕航向以 ±150° 的范围偏向前方。这种方法可避免智能体再次收集刚探索过区域中的已有信息，并使信息范围保持向前偏置。

另一种方法是持续更新节点间的行进成本（距离）地图。如果当前节点没有可探索的间隙，传统方法会按照遍历顺序回溯，并在之前的节点中寻找未探索间隙。但在所提出的智能导航系统中，下一步要探索的节点由对各节点行进成本的分析结果决定，并选择行进成本最低的未探索节点。这在复杂环境中尤为有效：当节点之间存在两条或更多条可供遍历的路径时，这些路径可通过上一节所述的“邻居识别”过程确定。因此，如果智能体在路径规划中发现了一条通往先前节点、成本更低的路径，就会有效利用这条已发现的路径，而不是简单回溯。图5中的示例清楚地展示了这一点：在没有进行显式扫描的情况下，已找到一条从 N2 到 N7 的路径。

提升建图效果的另一种方法是优先选择最小宽度间隙进行探索。如上所述，选定要前往的相应节点后，还需要在该节点中选择一个间隙。

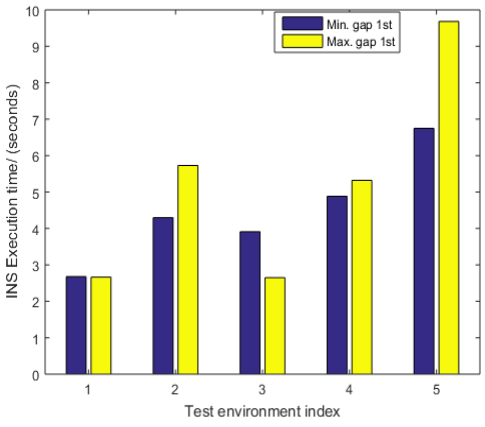

图6 – 智能导航系统执行时间比较

这里基于一个普遍假设：在真实环境中，较窄的间隙更有可能导致路径汇聚并抵达死胡同，而较宽的间隙则不然。因此，应先选择最小宽度间隙进行探索，然后再进入更宽阔的区域，因为在那里路径汇聚的可能性要低得多。作为对效果的定量分析，图6比较了智能导航系统在五种测试环境中采用“先选最小间隙”与“先选最大间隙”两种方法时的执行时间。通过对比分析可以得出结论，优先探索最小间隙是一种高效的探索方法。

5. 定位 - 同步定位与建图

准确定位或确定精确位置对于建图任务至关重要。由于现有的GPS系统只能提供数米的精度，且在室内也无法正常工作，因此本研究采用同步定位与建图方法作为定位手段 [16]。尽管同步定位与建图中使用扩展卡尔曼滤波器十分普遍 [13]，，但由于其计算复杂度较高，本研究采用了基于相似变换和粒子滤波器（蒙特卡洛定位）[14] [15] 的方法。

在这两种方法中，首先使用编码器读数估算位置，然后使用激光测距仪数据修正位置估计。使用激光测距仪通过微分来查找相关特征/物体。

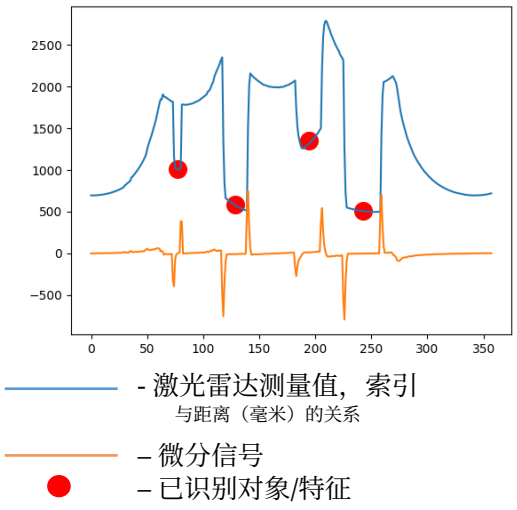

图 7 – 特征识别

5.1 相似变换

该方法通过寻找变换的最优参数估计，将智能体变换回正确的位置。该方法假设定位误差发生在智能体沿曲线路径行进时。检测到的特征位置可用于校正。通过相似变换，找出错误的物体位置与先前确定的同一物体位置之间的对应关系，并利用递归方法优化变换参数，以尽量减小相似变换的误差。该变换可表示为：

$$\lambda R l_i + t = r_i ;$$

$$R\ (rotation\ matrix) = \begin{bmatrix} cos\alpha & -sin\alpha \\ sin\alpha & cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$t\ (translation\ matrix) = (t_x, t_y)$$

通过最小化绝对误差之和，可以优化公式（1）。随后，利用确定的变换重新映射对象并校正位置，如图7所示。（a）和（b）展示了对象如何被重新映射，以及智能体路径如何得到校正。

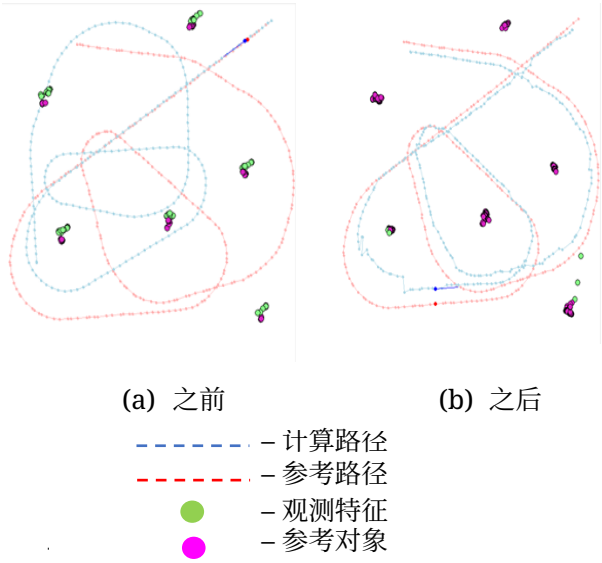

图 8 – 应用相似变换

5.2 粒子滤波器（快速SLAM）

相似变换方法的主要缺点是在实时环境中难以收敛到经过优化的参数集。因此，采用了另一种基于贝叶斯滤波的方法，即粒子滤波器。粒子滤波SLAM [15] 是更好的解决方案，因为其收敛速度非常快，并且通过对估计结果进行概率推断，还可以处理激光测距仪中的不确定性。初始时，假设智能体可能处于任意位置和任意方向。然后，利用粒子密度计算位置估计，通过粒子表示位置及其方向。这是一个两步骤过程，



（a）应用校正之前　　（b）已应用校正　　（c）平均粒子估计的路径密度

图 8 – 应用粒子滤波器

A). 预测步骤-通过对正态分布进行迭代采样生成粒子，以表示位置

$$for\ i = 1\ to\ n;$$
$$sample\ x^{(i)} \sim N(\mu, \sigma^2); \quad (2)$$

Th粒子i根据 i l
应用的控制信号进行转换，然后使用重采样轮盘技术重新采样。
这是一种方法，它会提高从权重较高的位置选择粒子的概率（权重是在校正步骤中计算的，而非其他步骤）。
p)

$$for\ i = 1\ to\ n;$$
$$sample\ x^{(i)} \sim p(x_t \mid x_{t-1}^{[n]}, U_t); \quad (3)$$

B）。校正步骤——通过匹配获得的测量值与粒子的位置，为粒子赋予权重。随着时间推移，这会减少离群值，并迅速收敛到实际路径。

按概率 α 抽取的样本 $w_t^{[i]}$

$$for\ i = 1\ to\ n;$$
$$w_t^{[n]} \sim p(z_t \mid \bar{x}_t^{[m]}, U_t); where\ z\ is\ LRF\ measurement$$
$$p\left(z_t \middle| \bar{x}_t^{[m]}\right) = \prod_i p(z_i | \bar{x}_t^{[m]}) \quad (4)$$
$$p\left(z_i \middle| \bar{x}_t^{[m]}\right) = p(d - \hat{d}) * p(\propto - \hat{\propto})$$
$$= N(d - \hat{d}, 0, \sigma_d^2) * N(\propto - \hat{\propto}, 0, \sigma_\alpha^2)$$

$d - \hat{d}$ = 距离误差
$\propto - \hat{\propto}$ = 方向误差
计算之后 ，

$$position\ estimation = 1/n * \sum_i x_i \quad (5)$$
$$orientation\ estimation = \tan^{-1}\left\{\frac{\sum_i \cos\vartheta_i}{\sum_i \sin\vartheta_i}\right\}$$

通过上述过程，可以实现粒子滤波SLAM。如图8所示，该方法能够获得更加准确的位置估计。

6. 结论

本研究着眼于为以下问题寻找一种简单且切实可行的解决方案：

构建未知环境地图这一工程问题。在所提出的方法中，选用低成本激光测距仪（LRF）作为传感器，因为与传统超声波传感器和复杂的视觉系统相比，它具有精度高且结构简单的优点。我们开发了用于校正失真并从激光测距仪获取数据的方法。不过，任何能够生成准确距离数据谱的合适传感器，都可以轻松替代激光测距仪。

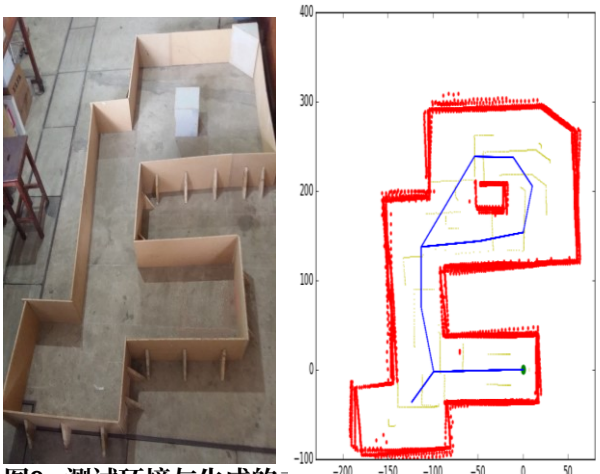

图9 –测试环境与生成的二维地图。

由于三轮全向移动平台能够方便地向任意方向移动，因此选用其作为硬件平台。为引导平台前往数据中的信息间隙，并实现最优路径规划，我们实现了一种独立的导航算法。诸如“最小间隙优先方法”和“智能邻居识别过程”等关键特征，使建图效果达到最优。

由于系统中基于编码器的位置测量存在误差，因此开发了一种并行运行的同步定位

与建图（SLAM）算法。我们对基于相似变换的方法和蒙特卡洛方法（粒子滤波器）进行了实验，并在系统上实现了基于粒子滤波器的快速SLAM。

综合上述方法的成果，我们得以为环境地图构建问题提出一种简单且可快速实现的解决方案。尽管本研究采用了特定的硬件配置，但所开发的算法可以快速适配其他硬件组合。此外，作为进一步改进，如果有视觉系统这类合适的传感器，就可以方便地将通过所提方法生成的二维地图扩展为该区域的完整三维地图。

致谢

本研究工作由斯里兰卡佩拉德尼亚大学工程学院电气与电子工程系承接并提供支持。

参考文献

[1] *N. Hatao*、*K. Okada* 和 *M. Inaba*，《室内辅助机器人在房间和走廊中的自主地图构建与导航系统》，载于《*2008*年*IEEE*国际机电一体化与自动化会议》，*2008*年，第*840–845*页。[2] *Y. L. Ip*、*A. B. Rad* 和 *Y. K. Wong*，《未知环境中的自主探索与建图》，载于《*2004*年国际机器学习与控制论会议论文集》（*IEEE*目录号*04EX826*），*2004*年，第*7*卷，第*4194–4199*页，第*7*卷。[3] *S. Yuan* 和 *H. Schumacher*，《用于二维和三维环境地图构建的车载微波雷达系统》，载于《*2015*年*IEEE MTT-S*智能移动微波国际会议（*ICMIM*）》，*2015*年，第*1–3*页。[4] *R. R. Dam*、*H. Biswas*、*S. Barman* 和 *A. Q. Ahmed*，《使用超声波传感器确定物体的二维形状》，载于《*2016*年第*3*届电气工程与信息通信技术国际会议（*ICEEICT*）》，*2016*年，第*1–5*页。[5] *D. Forouher*、*M. G. Besselmann* 和 *E. Maehle*，《深度相机与超声波数据的传感器融合：用于障碍物检测和机器人导航》，载于《*2016*年第*14*届控制、自动化、机器人与视觉国际会议（*ICARCV*）》，*2016*年，第*1–6*页。[6] *K. Konolige*、*J. Augenbraun*、*N. Donaldson*、*C. Fiebig* 和 *P. Shah*，《低成本激光测距传感器》，载于《*2008*年*IEEE*国际机器人与自动化会议》，*2008*年，第*3002–3008*页。[7] *S. Zhou*、*Y. Kang* 和 *X. Shi*，《四旋翼飞行器的室内定位、导航与建图》，载于《*2014*年*IEEE*中国制导、导航与控制会议论文集》，*2014*年，第*2669–2674*页。[8] *A. H. A. D. Abeysekara*、*D. P. Liyanage*、*W. R. C. B. S. Welikala*、*G. M. R. I. Godaliyadda*、*M. P. B. Eakanayake* 和 *J. V. Wijayakulasooriya*，《通过传感器融合为侦察机器人生成深度图》，载于《*2015*年第*10*届*IEEE*工业与信息系统国际会议（*ICIIS*）》，*2015*年，第*320–325*页。[9] *A. N. Catapang* 和 *M. Ramos*，《使用二维激光雷达系统进行自动驾驶车辆的障碍物检测》，载于《*2016*年第*6*届*IEEE*控制系统、计算与工程国际会议（*ICCSCE*）》，*2016*年，第*441–445*页。[10] *P. A. Plonski*、*J. V. Hook*、*C. Peng*、*N. Noori* 和 *V. Isler*，《自主水面航行器使用前视声呐绕行未知障碍物》，载于《*2015*年*IEEE*安全、防护与救援机器人国际研讨会（*SSRR*）》，*2015*年，第*1–7*页。[11] *E. W. Dijkstra*，《关于图的两个问题的注记》，《数值数学》，第*1*卷，第*269–271*页，*1959*年。[12] *M. T. Sqalli* 等，《使用同步定位与地图构建算法改进远程呈现机器人的自主导航》，载于《*2016*年微纳机电一体化与人类科学国际研讨会（*MHS*）》，*2016*年，第*1–7*页。[13] *A. B. S. H. M. Saman* 和 *A. H. Lotfy*，《扩展卡尔曼滤波器在同步定位与建图中的实现》，载于《*2016*年第*6*届智能与先进系统国际会议（*ICIAS*）》，*2016*年，第*1–4*页。[14] *F. R. Q. Aini*、*A. N. Jati* 和 *U. Sunarya*，《机器人操作系统上的蒙特卡洛定位研究》，载于《*2016*年信息技术系统与创新国际会议（*ICITSI*）》，*2016*年，第*1–6*页。[15] *L. Zhao*、*Z. Fan*、*W. Li*、*H. Xie* 和 *Y. Xiao*，《基于二维地图中的蒙特卡洛定位构建三维室内地图》，载于《*2016*年工业信息学国际会议——计算技术、智能技术与工业信息集成（*ICIICII*）》，*2016*年，第*236–240*页。[16] *G.I.R.K. Galgamuwa*，《一种针对同步定位与建图问题的新型扫描匹配算法》，工程学硕士论文，电气与电子工程系，工程学院，佩拉德尼亚大学，斯里兰卡佩拉德尼亚，*2016*年*1*月。

2017

[17] *D.M.N Jayasuriya*、*W.L.Y.S Liyanage*、*H.M.A.S Herath*、*G.M.R.I. Godaliyadda*、*M.P.B Ekanayake* 和 *J.V Wijayakulasooriya*，《用于未知环境地图构建的智能导航系统》，载于《*2016*年第*8*届*IEEE*信息与自动化可持续发展国际会议（*ICIAfS 2016*）》，斯里兰卡加勒，*2016*年*12*月。