

扫地机器人全方位定位与区域覆盖算法研究

朱天宇

上海星河湾双语学校 上海

【摘要】近年来，扫地机器人作为智能家居的重要组成部分大大提高了生活便利性，而精准定位和全区域覆盖作为扫地机器人自主工作的核心被广泛研究。本文面向大范围室内固定场景探究扫地机器人室内定位和区域覆盖一体化系统，首先提出基于滚动时域优化的多锚点定位算法，该算法可以在减少成本的基础上大大提高定位精度；同时，为了提高覆盖效率，减少扫地机器人冗余运动，本文使用离线生成树算法进行区域覆盖，该算法基于扫地机器人的单位覆盖范围进行清扫路径规划，可以在完成覆盖任务同时回到原点。本文使用 Python 进行仿真实验，实验验证了该系统可以在精准估计扫地机器人位置的同时完成全区域覆盖。

【关键词】扫地机器人；多锚点状态估计；区域覆盖

【收稿日期】2023 年 8 月 6 日 **【出刊日期】**2023 年 9 月 27 日 **【DOI】**10.12208/j.aics.20230034

Research on robotic vacuum cleaner omnidirectional positioning and area coverage algorithms

Tianyu Zhu

Shanghai Starriver Bilingual School, Shanghai

【Abstract】In recent years, as an important component of intelligent furniture, the sweeping robot has greatly improved the convenience of life, while precise positioning and full-area coverage as the core of the sweeping robot's autonomous work have been widely studied. This paper aims to explore the integrated system of indoor positioning and area coverage of sweeping robots for large-scale indoor fixed scenes. Firstly, a multi-anchor positioning algorithm based on Moving Horizon Estimation (MHE) is proposed, which can greatly improve the positioning accuracy on the basis of reducing costs. At the same time, in order to improve the coverage efficiency and reduce the redundant movement of the sweeping robot, this paper uses the offline STC algorithm for area coverage, which is based on the robot's unit coverage range. Allowing the robot to complete the coverage task and return to the starting point. In addition, Python is used for simulation experiments in this paper, and the experimental results verify that the system can complete full-area coverage by accurately estimating the position of the sweeping robot.

【Keywords】Robot vacuum cleaner; Multi-anchor state estimation; Area coverage

引言

扫地机器人是一种自动化家居清洁设备，旨在减轻人们的日常清扫工作负担。它们通常采用传感器、摄像头和机器学习技术来感知周围环境，并根据预定的算法来规划和执行清扫任务。由于市场需求的逐步增加^[1]，扫地机器人技术在不断改进，以提高性能和用户体验。这包括更先进的传感器技术^[2]、更强大的处理能力^[3]、更智能的区域覆盖以及路径规划算法^[4]等。

现有的扫地机器人状态估计算法主要采用机载

传感器进行状态估计，比如文献^[5]设计并实现了一种基于陀螺仪和码盘的自主定位机器人系统，通过这种方法可以实现高精度定位，但是由于陀螺仪和码盘测量噪声比较高，使得这种方法目前只能在短时间内精准估计机器人状态。为了解决这个问题，文献^[6]中设计并实现了一种基于室内天花板的扫地机器人单目视觉定位算法，使用低成本的视觉传感器实现了精度较高和鲁棒性较强的定位效果。但由于视觉传感器受环境光影响较大，这种方法在室内光线不足或者过亮的情况下，定位效果会受到限制。

考虑上述两种方法的局限性，本文提出了基于滚动时域优化的多锚点定位算法，由于 UWB 测距受环境影响较小且在固定环境内较易排布多 UWB，故而使用这种方法进行状态估计效果稳定且精度较高。

除了状态估计之外，扫地机器人还需对目标环境进行区域覆盖。现有区域覆盖算法已得到了广泛研究，比如文献^[7]中提出一种以阿基米德螺线为主要行走方式，用直线循环往复行走补充边角区域的路径规划方法，这种方法可以高效覆盖目标区域。除此之外，文献^[8]中提出了利用遗传算法对清洁机器人进行全区域路径规划的方法，这两种方法虽然都有效地完成覆盖任务，但是比较受限于具体覆盖环境。基于此，本文提出基于离线生成树算法进行区域覆盖，该算法通过将目标区域按照单体覆盖能力进行网格划分，对于划分后的网格生成覆盖树，在完成区域覆盖的同时使机器人自然回到起始点，从而提高了扫地机器人的工作效率和工作可行性。

1 扫地机器人多锚点定位算法

基于超宽带 (Ultra-Wideband, UWB) 的多锚点定位算法是一种用于确定目标位置的技术，通过使用 UWB 信号来测量目标与多个已知位置的锚点之间的距离信息来进行定位。图 1 展示了在任意场景下扫地机器人多锚点定位系统，记扫地机器人的位置为 (x, y) ，若系统内存在 n 个 UWB 模块，则记多锚点位置分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ..., (x_n, y_n) ，通过 UWB 测量得到的多锚点到扫地机器人距离分别为 d_1, d_2, \dots, d_n 。

在使用 UWB 技术进行距离测量的过程中存在高频噪声，这会严重干扰测量结果的准确性。为了减少高频噪声的影响，许多低通滤波器如 Butterworth 滤波器^[9]、Chebyshev 滤波器^[10]以及 elliptic 滤波器^[11]等被用来滤除高频信号。然而，当信号通过上述滤波器时，不可避免地会引入相位偏移，考虑到频率响应特性，截止频率越低，相位偏移就会越大。为了解决这个问题，Savitzky 和 Golay^[12]提出了一种基于最小二乘拟合的替代方法。这种方法可以将输入样本拟合成一个局部多项式，从而消除高频噪声。具体滤波过程如下，首先，对于一组以 $z = 0$ 为中心的、包含 $2M + 1$ 个样本点的信号样本 $x[z]$ ，使用 N 节多项式 $p(z)$ 拟合样本数据。如式 (1) 所示， a_k 为多项式中 z^k 项的系数：

$$p(z) = \sum_{k=0}^N a_k z^k$$

为了获得多项式系数 a_k ，使用最小化拟合多项式和输入样本之间的误差 ϵ_N 来得到，计算表达式为：

$$\begin{aligned} \arg \min_{a_k \in \mathbb{R}} \epsilon_N &= \sum_{z=-M}^M (p(z) - x[z])^2 \\ &= \sum_{z=-M}^M \left(\sum_{k=0}^N a_k z^k - x[z] \right)^2 \end{aligned}$$

为了确定最优系数，对 ϵ_N 中的每个 a_i 求偏导求得在偏导等式为 0 时的各项系数：

$$\frac{\partial \epsilon_N}{\partial a_i} = \sum_{z=-M}^M 2z^i \left(\sum_{k=0}^N a_k z^k - x[z] \right) = 0$$

图 2 展示的是分别使用 Savitzky-Golay 滤波器以及不使用滤波器状态下 UWB 测距效果，从图中可以明显看出使用 Savitzky-Golay 滤波器可以在更贴近原始数据结果的基础上滤除高频噪声。

基于优化的滚动时域估计算法能够根据过去一段时间内的量测数据生成状态估计值。对于基于多锚点的移动机器人的实时定位，可以将其整理为一个优化问题：

$$\begin{aligned} J = \min \sum_{i=1}^{nt} & \left(\gamma_1 ((x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2) \right. \\ & + \gamma_2 ((x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + \dots \\ & \left. + \gamma_n ((x_n - x)^2 + (y_n - y)^2) \right) \end{aligned}$$

其中 n_i 为时间窗口的长度， $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ 为各个锚点对应误差项的系数。根据两个锚点之间距离越远、固体障碍物越多测距精度会越差的距离特性，对误差项系数 γ 进行设计：

$$\gamma_i = \frac{1}{d_i}$$

其中 d_i 是第 i 个锚点的测距信息。

2 扫地机器人离线生成树覆盖算法

离线生成树覆盖算法的输入是一个负有静定障碍物平面的几何描述，如图 3-a 所示，首先记这个算法首先将平面区域用边长为 $2D$ 的元胞分割，然后以分割后的元胞的中心点为顶点 V 以连接各个中心点

的线段为边 E ，将整个平面表示成图结构 $G(V, E)$ 。在现有图结构 $G(V, E)$ 的基础上，连接各个顶点形成一条没有环结构的树，如图 3-b 所示，即为覆盖路径的生成树，基于生成树便可得到最终的覆盖路径。离线随机树算法的具体过程如下：

输入：转化成 2 维图结构的环境几何描述 G ，以及一个起始的元胞单元 S 。

预处理：将个边长为 $2D$ 的元胞划分成 4 个边长为 D 的子胞，记每个元胞的中心为顶点 V ，将所有的顶点使用深度优先搜索算法 (DFS) 进行连接，最终构成一棵生成树。

覆盖过程：从子胞 S 开始，以顺时针或者逆时针方向沿着生成树附近的子胞进行遍历，直到最终回到子胞 S 为止。

3 仿真实验

为了得到多锚点状态估计的准确性，在 python 中进行仿真实验，首先设定一段运动轨迹，并设定

几个静止锚点模拟 UWB 测距，对不同锚点测距的真实值增加高斯噪声，再使用滚动时域优化算法进行状态估计，从图 4 中可以看到，实线代表估计得到的状态值、虚线代表真实测得状态值。从中不难看出，使用滚动时域优化算法进行状态估计可以精确得到真实状态，并使得估计结果保持光滑性和持续性。

在使用多锚点定位系统获得机器人状态之后，需要按照离线规划好的地图进行环境空间覆盖。为了测试离线生成树算法的有效性，在 python 中进行环境模拟和仿真实验。首先，我们使用矩形模拟任意大范围场景，并在场景中随机生成障碍物，如图 5 所示，其中不同色块代表环境障碍物。从图中可以看出，红色的线为最终生成的路径，而使用离线生成树算法最后可以达到的有效覆盖率在三种不同的随机场景下均为 100%，这有效证明了离线随机树算法的有效性。

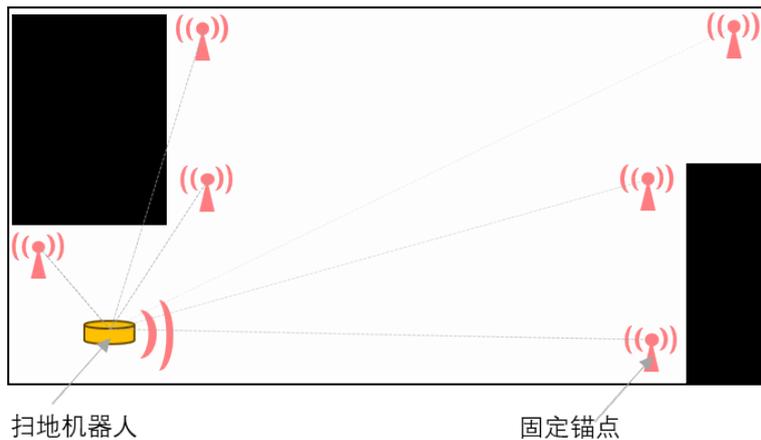


图 1 扫地机器人多锚点定位系统

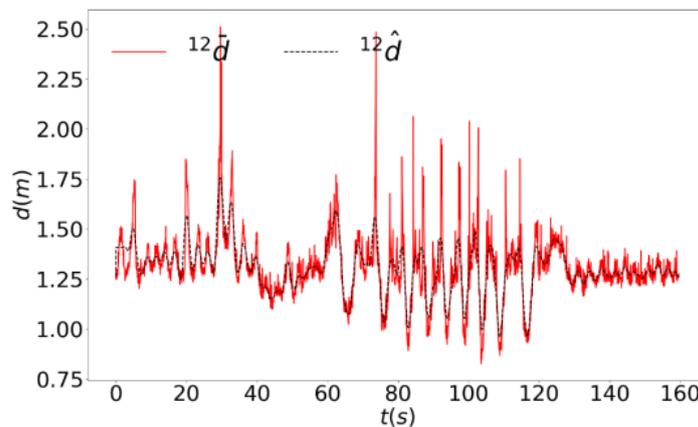


图 2 使用 Savitzky-Golay 滤波器去除 UWB 测距噪声效果

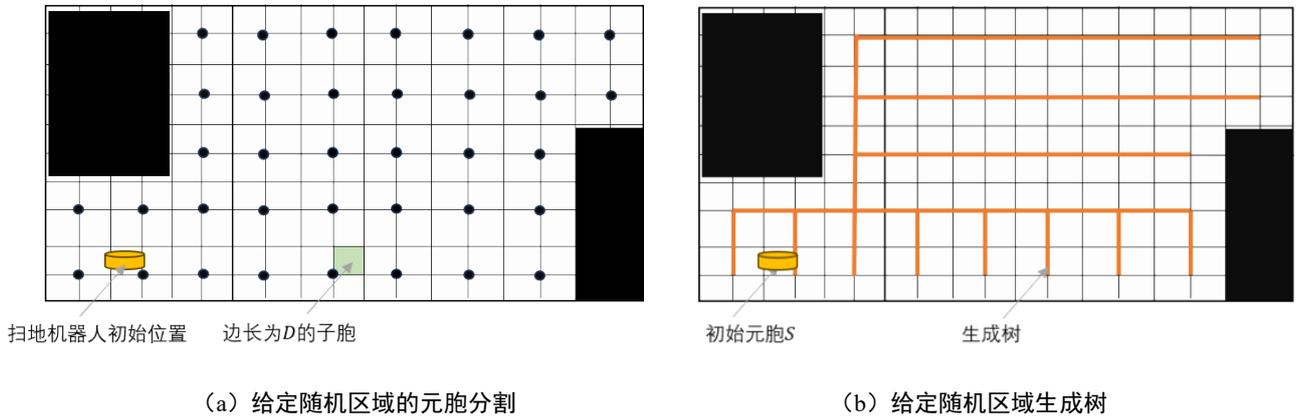


图3 离线生成树算法描述

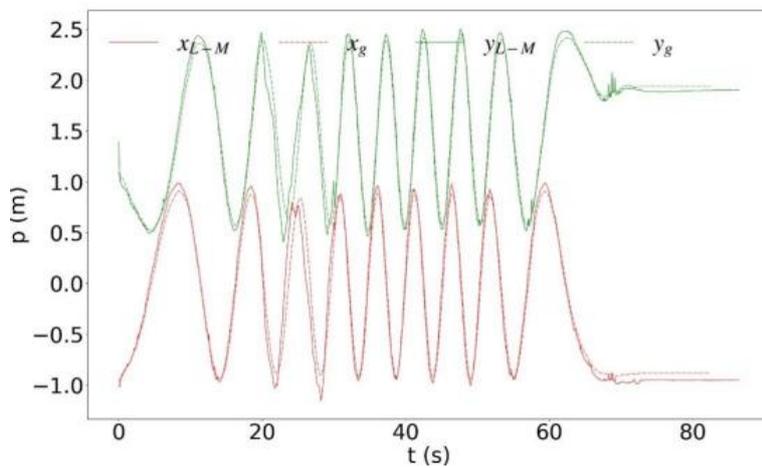


图4 扫地机器人多锚点定位系统精度

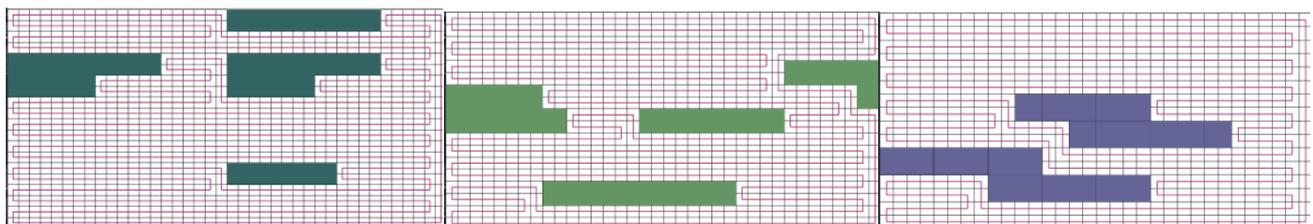


图5 三种不同随机场景下覆盖算法效果

4 结束语

本文面向大范围室内固定场景提出扫地机器人室内定位和区域覆盖一体化系统，首先提出基于滚动时域优化的多锚点定位算法，该算法可以在固定室内环境中实现稳定精准定位；同时，本文基于离线生成树算法生成覆盖路径，该算法可以在完成覆盖任务同时回到出发原点。

最后，本文使用 Python 进行仿真实验，实验验证了扫地机器人室内定位和区域覆盖一体化系统的有效性和稳定性。

参考文献

- [1] 张丽娜. 扫地机器人市场越来越“卷” [N]. 消费日报,2023-08-17(A02).
- [2] 高识杰. 基于红外信号的智能扫地机器人设计[J]. 无线互联科技,2023,20(14):35-38.
- [3] 张弛洲. 基于惯性导航的扫地机器人关键技术研究与实践[D]. 南昌大学,2021.
- [4] 黄月琴,罗兵,邓辅秦等. 智能扫地机器人的全覆盖路径规划[J]. 五邑大学学报(自然科学版),2021,35(02):51-58.

- [5] 徐明钊,于海涛,杨春等.基于陀螺仪和码盘的自主定位机器人系统[J].兵工自动化,2016,35(10):60-63.
- [6] 王晓彤. 基于单目视觉的扫地机器人定位算法设计及实现[D].中国科学技术大学,2018.
- [7] 王栋,周可璞.基于阿基米德螺线走法的全区域覆盖路径规划[J].工业控制计算机,2018,31(05):83-84+87.
- [8] 蒋玉杰,曾岑.清洁机器人基于遗传算法的全区域路径规划[J].机械制造,2009,47(05):18-20.
- [9] I. W. Selesnick and C. S. Burrus, "Generalized digital Butterworth filter design," IEEE Transactions on signal processing, vol. 46, no. 6, pp. 1688-1694, 1998.
- [10] J. D. Rhodes and S. Alseyab, "The generalized Chebyshev low-pass prototype filter," International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 8, no. 2, pp. 113-125, 1980.
- [11] J. D. Rhodes, "The stepped digital elliptic filter," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 17, no. 4, pp.178-184, 1969.
- [12] A. Savitzky and M. J. Golay, "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures." Analytical chemistry, vol. 36, no. 8, pp. 1627-1639, 1964.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS