

基于采样的血管介入式路径规划算法综述

王硕 余锦涛 杨婷

徐州医科大学医学信息与工程学院，江苏徐州，221004；

摘要：心血管类疾病对人体健康构成了极大的威胁，随着医学技术的进步和计算机算法技术的不断发展，目前在计算机辅助下的血管介入手术在心血管疾病方面被广泛运用。本文基于路径规划算法对血管介入手术进针路线的规划进行研究。运用路径规划算法对针的行进路线进行预测规划可以更好的规避障碍物，同时为术中医生操作提供更好的依据，相比传统血管介入手术，该方法具有安全性更高，准确性更优的特点。

关键词：血管介入式；路径规划算法；医学治疗

DOI：10.69979/3041-0673.25.08.029

引言

近年来，人们的压力增大，导致心血管类疾病发病率增高，血管介入手术是治疗心血管类疾病的重要手段^[1]。传统血管介入技术主要依赖医生的手动操作，医生的经验手感和视觉在传统血管介入中非常重要，而这也导致传统血管介入手术存在一些不可控的弊端，可能导致对患者造成不必要的伤害。

血管介入治疗中的术前路径规划不仅能够提高治疗的精准性、安全性和效率，还能有效减少手术并发症。通过术前规划，医生可以在治疗过程中减少不确定性。路径规划算法主要分为经典路径规划算法，基于采样的路径规划算法，基于图的路径规划算法，以及其他路径规划算法。

目前血管介入治疗中使用较多的路径规划算法主要是基于采样的路径规划算法：Rapidly-exploring Random Tree Star (RRT)*, EST (Expansive Space Trees), 快速扩展随机树 (RRT, Rapidly-exploring Random Tree), 采样一致性路径规划 (Probabilistic Roadmap Method, PRM) 等等。

1 运用在血管介入式中的路径规划算法

1.1 血管介入式介绍

血管介入式治疗是通过最小创伤的方式，对血管疾病进行诊断和治疗的一类医学技术，具体流程如下：

手术前先对患部进行 CT 或 MRI 扫描，得到患部的序列图像，利用图像滤波等技术得到患者头部的三维模型。

根据三维模型确定病变区域并结合路径规划算法进行手术进针路径的规划。

在术中利用定位设备实时地测出手术器械的位置，以便辅助手术医师完成复杂的手术操作。

1.2 传统血管介入手术前的路径规划存在的难题

血管介入手术中一个好的路径规划方案可以提高手术精确性和效率^[2]。目前在算法辅助下的路径规划仍然存在很多挑战，例如：（1）血管介入手术的路径规划涉及三维空间的复杂计算，计算资源的需求较高。（2）现有的路径规划算法可能不适合高维度环境等

1.3 路径规划算法的介绍

路径规划算法是指在给定环境或地图的条件下，计算从起点到目标点的最优或可行路径的算法^[3]。通常分为以下几类：

1.3.1 经典路径规划算法

（1）Dijkstra 算法

Dijkstra 算法是一种经典的最短路径算法，通常用于寻找从起点到目标点的最短路径。

（2）A*算法

A*算法结合了 Dijkstra 算法的最短路径搜索和贪心算法的启发式策略^[4]。

1.3.2 基于采样的路径规划算法

（1）RRT (Rapidly-exploring Random Tree)

RRT 的核心思想是从起点出发，通过随机扩展生成一棵树，直到树中某个节点能连接到目标点。

（2）PRM (Probabilistic Roadmap Method)

PRM 通过在配置空间中随机采样点，构建一个概率性道路图 (roadmap)，然后在图中找到起点到目标点的路径。

1.3.3 基于图的路径规划算法

（1）广度优先搜索 (BFS)

广度优先搜索通过层层扩展节点，保证能够找到最短路径，适用于无权图。

（2）深度优先搜索 (DFS)

深度优先搜索从起点开始，沿着某一分支走到底，然后回溯到未访问的分支，直至找到目标点。

1.3.4 其他路径规划算法

主要有遗传算法和人工势场法的应用。

血管介入手术的一些复杂病例中,血管的变形可能是动态的,且不完全可预知。基于采样的路径规划算法,如 RRT 和 PRM 等,通过随机采样或图结构来探索复杂空间,能够更好的适应血管网络,因此着重介绍基于采样的路径规划算法

2 基于采样的路径规划算法

2.1 快速扩展随机树 (RRT, Rapidly-exploring Random Tree)

2.1.1 RRT 算法介绍

RRT (快速探索随机树) 是一种基于随机采样的路径规划算法,主要用于高维空间中的路径搜索^[5],尤其适用于复杂和动态环境。RRT 算法的基本思想是通过逐步扩展树的方式从起点出发,探索整个空间,直到找到目标。

2.1.2 RRT 算法的基本流程

初始化:从起点开始,创建一个树(Tree),树的根节点是起点。

随机采样:在空间中随机选择一个点(称为“采样点”)。

树扩展:从树中最近的一个节点向采样点扩展,生成新的节点,如果新节点没有碰撞障碍,则将其加入到树中。

重复步骤 2 和 3:重复上述步骤,直到树中的节点连接到目标区域。

路径回溯:一旦树连接到目标区域,通过回溯树上的节点,可以得到从起点到目标的路径。

2.1.3 RRT 算法的优缺点

(1) RRT 算法的优点

高效性:在高维空间中,RRT 算法能够迅速探索整个环境,因此能够较快地找到可行路径。

适用性:适用于高维空间和复杂环境,能够处理动态和不确定的环境。

(2) RRT 算法的缺点

路径质量较差:RRT 生成的路径通常较为粗糙,且可能包含许多急转弯。

计算复杂度高:尽管 RRT 能快速找到路径,但路径的质量和收敛速度不稳定,可能需要较长的计算时间来优化路径。

2.2 PRM 算法(概率路网法 Probabilistic Roadmap Method)

2.2.1 PRM 算法介绍

PRM (概率路网方法) 是一种基于采样的路径规划算法,适用于多障碍物的高维空间,特别适合用于复杂环境中求解路径问题^[6]。

2.2.2 PRM 算法的基本流程

采样:在工作空间内随机采样一定数量的点。

构建图:将采样点连成图,通过检查两点之间是否存在障碍物来决定是否连接这两点。如果两点之间没有障碍物,就在图中加入一条边连接这两点。

图连接:构建完图之后,从起点到目标点分别搜索最短路径,通过图中已建立的连通关系,找到起点到目标点的路径。

路径优化:在找到初步路径后,可以进一步对路径进行优化,例如平滑路径或减少路径长度。

2.2.3 PRM 算法的优缺点

(1) PRM 算法的优点

适用于复杂环境:PRM 适合在复杂的环境中使用,尤其是当环境中有多多个障碍物时,能够有效避免碰撞。

高效性:通过构建图结构,PRM 能够更快速地找到从起点到目标的路径,尤其在高维空间中表现出较好的效率。

(2) PRM 算法的缺点

采样密度问题:PRM 的效率高度依赖于采样点的分布和密度。如果采样不足,可能导致图的连通性差,从而影响路径规划的效果。

图构建时间长:当采样点数量过多时,构建图的时间复杂度可能较高,尤其是在非常高维的空间中。

2.3 EST (Expansive Space Trees, 扩展空间树) 算法

2.3.1 EST 算法介绍

EST 算法的核心思想是通过不断地扩展树结构,以寻找从起点到目标点的路径。不同于传统的随机扩展树(RRT)方法,EST 算法的扩展是“广泛”的,尝试在空间中进行更大范围的探索。与 RRT 相似,EST 也是通过随机采样生成树的节点,然后扩展树,但 EST 通过“广泛扩展”而不仅仅是局部搜索来提高搜索的效率。

2.3.2 EST 算法的基本流程

初始化树:从起点开始初始化一个扩展空间树,树的根节点是起点。该树将会逐步在搜索空间中扩展。

随机采样:从工作空间中随机采样一个点。这个点的采样是完全随机的,类似于 PRM (概率路网法) 和 RRT (快速扩展随机树) 中的采样方法。

扩展树:一旦采样到新的随机点,算法会通过扩展树的方式连接到该点。不同于 RRT 的局部扩展,EST 算法在连接时更倾向于进行较大幅度的扩展,以更广泛地

覆盖空间。

检查可行性：检查从树的现有节点到采样点之间的路径是否可行，即该路径是否与障碍物发生碰撞。如果路径是可行的，则将该点添加到树中，并将其连接到树的适当位置。

重复采样和扩展：重复步骤 2 和步骤 3，直到树成功扩展到目标区域，或找到一个从起点到目标点的路径。

路径提取：一旦树扩展到目标区域，可以从目标节点回溯到起点，提取一条完整的路径。通过路径优化，可以进一步平滑路径。

2.3.3 EST 算法的优缺点

(1) EST 算法的优点

更好的空间覆盖性：EST 在高维复杂环境中能更广泛地探索空间，从而提高了找到可行路径的概率。

适应性强：它能够适应较为复杂的环境，包括动态环境或具有较多障碍物的环境。

快速：与一些传统算法相比，EST 能够在较短的时间内找到路径，尤其是在高维空间中表现较好。

(2) EST 算法的缺点

路径不光滑：EST 生成的路径可能包含许多转弯，需要后期平滑处理。

可能的路径冗长：由于 EST 的扩展方式较为广泛，它可能会生成一些冗长的路径，需要后续优化。

计算成本较高：在某些情况下，EST 可能会生成较多的节点，从而增加计算开销。

3 PRM 算法在血管介入手术中的应用

PRM 算法在血管介入手术中的具体应用过程如下：

空间建模：采用医学影像（如 CT、MRI 等）对血管进行三维重建，生成血管的三维模型。这些模型为 PRM 算法提供了一个明确的工作空间。

采样节点：在血管的三维空间中，PRM 算法通过随机采样生成多个节点，这些节点代表了可能的导管位置。在血管狭窄区域，采样节点会特别集中，以确保规划的路径能够避开这些区域。

图的构建：通过检测血管内的障碍物（如血栓、动脉粥样硬化斑块等），PRM 算法构建一个连接所有采样节点的图。只有没有障碍物的路径才会被认为是连通的。图的连通性确保了路径能够有效地从起点（导管的插入点）延伸到目标点（病变区域）。

路径规划与优化：一旦构建好图，PRM 算法可以计算从起点到目标点的最短路径，保证导管能够安全、精确地到达目标区域。与此同时，路径优化算法可以进一步优化路径，减少导管的运动轨迹，避免不必要的弯曲或碰撞。

4 总结

基于采样的血管介入式路径规划算法是医疗机器人领域中的一项关键技术。此技术主要借鉴了机器人路径规划领域的成熟技术，并结合了血管介入手术的具体需求。

文章首先介绍了可以运用在血管介入手术中的路径规划算法，接着具体列举了路径规划算法的几大类，结合血管介入手术的实际环境，以及传统血管介入手术前的路径规划存在的难题确定基于采样的路径规划算法最适合用于血管介入手术的路径规划。例如 PRM 算法，RRT 算法等等。利用 PRM 或 RRT 算法在病人的 3D 模型中随机采样，生成从手术入口到目标病变部位的无障碍路径。在手术过程中，实时检测导管尖端位置，并根据算法生成的路径进行导航，确保导管准确到达病变部位。

总之，基于采样的血管介入式路径规划算法提高了手术的精准度和安全性，降低了手术风险，随着算法的不断改进和医疗技术的持续发展，相信此类算法将在更多领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] 王鉴, 高翔, 张峰, 等. 血管介入机器人辅助介入治疗研究现状[J]. 介入放射学杂志, 2023, 32(06): 619-623.
- [2] 何昊, 叶子健, 舒畅. 血管介入手术机器人系统关键技术及研发现状[J]. 中国普通外科杂志, 2021, 30(12): 1477-1484.
- [3] 孙普一, 衣俊霖, 覃开远, 等. 基于不同路径规划算法之间的差异研究[J]. 高科技与产业化, 2025, 31(01): 12-14.
- [4] 李志鹏. 基于 PRM 的移动机器人路径规划算法[J]. 自动化应用, 2024, 65(05): 44-46. DOI: 10.19769/j.zdhy.2024.05.012.
- [5] 宋子杨, 施卫. 基于改进 RRT 算法的无人车路径规划研究[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(30): 21-24. DOI: 10.14004/j.cnki.ckt.2024.1583.
- [6] 孙伟昌, 罗志浩, 石建迈, 等. 无人机覆盖路径规划方法综述[J/OL]. 控制理论与应用, 1-21[2025-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20241130.0849.004.html>.

作者简介：王硕（2004—）男，江苏连云港人，本科生，研究方向：医学信息工程。

杨婷（1986—），通讯作者（E-mail: xzhmugongzuo@163.com），女，博士研究生，研究方向：路径规划算法。