

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306357

穿刺手术柔性针路径规划技术现状和展望^{*}

张 帆^{1,2} 何彦霖^{1,2} 周康鹏^{1,2} 祝航威^{1,2} 祝连庆^{1,2}

(1. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100192; 2. 北京信息科技大学光电测试技术及
仪器教育部重点实验室 北京 100016)

摘 要:微创穿刺手术由于具有创伤小、恢复快等优势,近年来在临床上得到广泛应用,主要用来进行组织活检、局部消融和局部麻醉等操作。目前穿刺手术使用的手术器械是斜尖柔性针,相比较于刚性针,前者可以避免重要的器官和组织,对患者的损伤较小。在手术过程中,有效的路径规划算法可以辅助医生提高手术的安全性和准确性,现有的术中路径规划算法的误差在毫米量级,限制了其在临床手术中的应用,亟待探讨解决方法。为此,梳理了穿刺手术中柔性针的路径规划研究进展,分析了影响路径规划的因素,对穿刺针的路径规划算法进行了详细的介绍,指出了当前需要解决的关键问题,最后从最优路径选择、参数反馈以及术中实时路径规划方法等不同方面出发探讨了柔性针手术穿刺针路径规划的未来发展方向。

关键词: 穿刺手术; 柔性针; 路径规划算法; 术中规划

中图分类号: TN253; TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Current situation and prospect of flexible needle path planning technology for puncture surgery

Zhang Fan^{1,2} He Yanlin^{1,2} Zhou Kangpeng^{1,2} Zhu Hangwei^{1,2} Zhu Lianqing^{1,2}

(1. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: Due to its advantages of small trauma and fast recovery, minimally invasive puncture surgery has been widely used in clinical practice in recent years, mainly for tissue biopsy, local ablation and local anesthesia. At present, the surgical instruments used in puncture surgery are oblique pointed flexible needles, which can avoid important organs and tissues and cause less damage to patients than rigid needles. In the process of surgery, effective path planning algorithms can assist doctors to improve the safety and accuracy of surgery, and the error of existing intraoperative path planning algorithms is in the order of millimeters, which limits its application in clinical surgery, and solutions need to be explored. Therefore, the research progress of flexible needle path planning in puncture surgery is sorted out, the factors affecting path planning are analyzed, the path planning algorithm of puncture needle is introduced in detail, the key problems that need to be solved are pointed out, and finally the future development direction of path planning of flexible needle surgical puncture needle is discussed from different aspects such as optimal path selection, parameter feedback and intraoperative real-time path planning method.

Keywords: puncture surgery; flexible needle; path planning algorithm; intraoperative planning

0 引 言

微创手术在现代医学外科手术中应用广泛,与开放

手术相比具有创口小、疼痛轻和恢复快^[1]等优点。微创手术以极小的伤口将特殊材料的针、导管和导丝等手术器械送至病灶区,达到治疗和诊断的效果。其中经皮穿刺手术^[2]是诊断和治疗癌症最普遍的微创手术之一,也

是许多医学诊断和治疗的主要方式。经皮穿刺手术^[3]是在医学影像设备计算机断层扫描(computed tomography, CT)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)和超声波(ultrasound, US)的引导下将穿刺针经皮刺入到达目标区域,进行活体病理组织检查、对组织进行消融和输送放射性粒子至病灶区等操作,被广泛应用与治疗前列腺、肺部、心脏和脑部等软组织器官^[4]。在穿刺手术中,常用的器械是穿刺针,主要分成刚性和柔性两种。刚性穿刺针以直线运动进行穿刺^[5],直线进针的路径会受到限制,并且穿刺过程中由于针的刚体特性容易触碰重要的血管或者神经,针体变形和患者的呼吸也会产生针体定位的偏差,导致无法到达目标位置,严重影响手术治疗的效果^[6]。

目前,经皮穿刺手术主要使用的器械是不对称的斜尖柔性针^[7],相比较于刚性穿刺针,柔性针带有不对称的针尖,在人体组织中的柔性穿刺针受到组织产生的作用力和摩擦力等^[8],发生弯曲从而实现在组织中的曲线运动,在穿刺过程中可以避开重要器官、神经和血管,达到目标靶点。柔性针在人体内进行穿刺产生复杂的轨迹,完全依靠医生完成穿刺的难度巨大,使用机器人辅助医生进行穿刺,规划穿刺可行的路径,不仅提高穿刺的准确度^[9],也大大减少了医生穿刺的难度。

柔性针的路径规划可以分成术前规划和术中规划两个阶段^[10],术前规划结合医学成像设备的影像等信息进行离线规划,术中规划是实时规划,需要结合当前柔性针的手术情况进行规划,两个阶段的规划都需要对针尖和针尾的运动进行规划。术中规划和术前规划的过程是类似的,区别在于术中规划需要实时的反馈来调整路径。在柔性针的路径规划中面临着针体变形、组织变形、针尖位置判定和目标靶点漂移等问题^[11],需要解决这些问题来提高规划的精确性,路径规划是研究柔性针穿刺运动的基础,对后续的研究具有重要的作用。

目前针对柔性针的路径规划多数以术中规划为主要研究方向,研究人员提出了多种路径规划算法。对于术中的实时路径规划,获取针尖姿态是实时规划的重要环节,依据获取的信息来控制针尖的运动,提高实时规划的精度。基于柔性针的穿刺特点,获取针尖实时姿态常用的方法有电磁传感、在线估计模型和光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感等方式。在整个手术环境中,电磁传感器受到电磁的干扰,相对于其他传感器来说,FBG 受到整个环境的影响最小,是当前研究的热点之一。

本文首先简要介绍了柔性针路径规划的关键技术,然后重点评述了当前常用的路径规划算法,从算法的精确度和临床应用两个方面出发,分别讨论了不同路径规划算法的优缺点。最后通过分析影响路径规划算法精度

的主要因素,给出了限制柔性针路径规划临床应用的关键问题和未来的发展方向。

1 柔性针路径规划关键技术

经皮穿刺手术的流程是在进行手术前,需要获取病人病灶区的位置^[12],利用医学影像设备扫描病人患病位置,根据扫描得到的图像信息确定病变组织的具体位置。外科医生根据从图像上得到的信息确定病人的穿刺入针位置和病人卧床体位,在手术过程中,医生需要多次进行 CT 扫描来确定进针深度和当前针的位置^[13]。根据目标位置和当前针的位置调整针前进的方向,重复上述过程直到到达目标靶点,穿刺手术流程如图 1 所示。

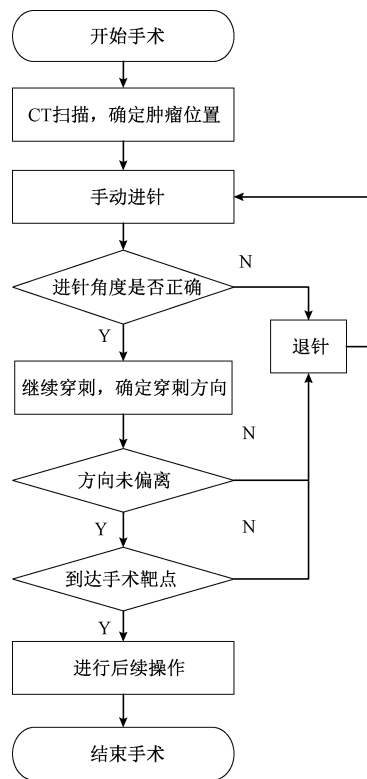


图 1 穿刺手术流程

Fig. 1 Flow chart of the puncture procedure

当前国内的医生进行一次肺穿刺手术平均需要穿刺 7~9 次,治疗时间平均为 30 min 左右^[14]。从手术流程中可以看出,穿刺手术的成功率受医生技术的影响较大,不同的医生进行手术,需要的扫描次数和穿刺次数也有所不同^[15]。过多的扫描次数会增加病人受到辐射的时间,对医生和病人的健康都有影响。术后是否发生并发症以及并发症的严重程度和穿刺次数呈正相关,穿刺次数增加,并发症发生的概率就会上升。肺出血、气胸、肿瘤转移等是肺穿刺手术中常见的并发症^[16],并发症严重影响病人的身体健康甚至威胁生命安全。

在术中,准确规划柔性针的穿刺路径,能够大量减少针的穿刺次数,降低因为多次穿刺而引起并发症的可能性。影响柔性针路径规划效果的因素主要有柔性针的路径形式、针尖与组织之间的相互作用和实时获取针尖的形状和位置等,通过改变以上因素可以提高路径规划的精度。

1.1 柔性针路径形式

穿刺手术中使用的穿刺针分为刚性针和柔性针,刚性针的针尖对称,柔性针的针尖呈斜面状,外形如图2所示。由于柔性针在刺入组织时受到组织的侧向力,针轴会发生弯曲,其轨迹呈曲线状。柔性针拥有两个自由度,一个是针的给进运动,一个是针的自转运动。给进运动实现了针的前进运动,自转运动实现了针尖位姿和针体弯曲方向的改变。柔性针的运动是受到限制的,不能实现任意形式的路径,但是可以通过在组织中改变和结合不同形式的运动,实现针穿刺的不同路径形式,穿刺出独特的路径^[17]。在二维的路径中,柔性针的路径形式基于给进运动和自转运动不同的组合形式呈现如下5种^[18]。

1) 定曲率圆弧路径:基于柔性针的两个运动方式,在柔性针只进行给进运动时,针将沿着定曲率的圆弧前进,此时圆弧的半径只与针尖的斜角角度相关,和前进的速度无关。

2) 不定曲率圆弧路径:柔性针同时进行给进运动和自转运动时,由于不同时刻的自转角度不同,针将沿着不同曲率的圆弧前进。

3) 多段圆弧路径:柔性针首先前进一段距离,然后停止,旋转针轴180°,调整方向继续前进,此时针的轨迹是两段连接的半径相等的圆弧。

4) 螺旋路径:柔性针同时进行给进和自转运动,自转运动要慢于前进运动,此时路径呈螺旋状。

5) 直线路径:柔性针同时进行给进和自转运动,自转运动要远远大于前进运动,在这种情况下穿刺针路径呈直线状。

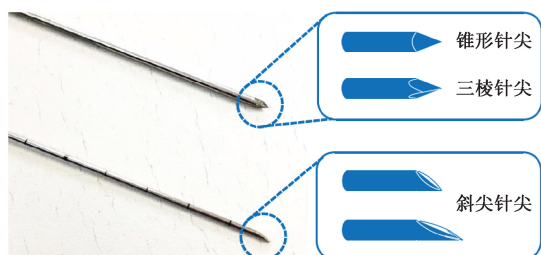


图2 穿刺针形状示意图^[19]

Fig. 2 Schematic of the needle shape^[19]

以上路径形式可以自由组合,实现穿刺手术中复杂的路径形式,2013年赵燕江等^[20]提出多种路径结合的方式

来优化柔性针的路径,在各种路径形式的规划中,最优路径一般都包含直线路径。该算法是基于二维的环境,优化依据是以控制度的数量和入针角度为主要判断因素,其选择的路径不是最优的路径。2018年哈尔滨工业大学 Zhao 等^[21]提出了一种基于等曲率圆弧和力学模型的路径规划算法,采用圆弧插值法规划路径,能够准确地模拟针在组织中的旋转情况,该算法避免了路径返回过大的问题。但是传统的机器人路径规划方法不适用于穿刺针的路径规划,因为柔性针的运动特点,其运动轨迹只能是圆弧状的曲线,导致针的路径中不能出现折线和点。圆弧的曲率也受到限制,不是任意曲率,这是当前柔性针路径规划的难点。

根据手术使用不同的医学影像设备,穿刺手术分成二维和三维影像导航手术,相应的路径规划分成二维和三维路径规划。二维的路径规划主要应用在 US、CT 等二维影像设备的导航中,三维的路径规划则是应用在三维超声、MRI 等三维影像设备的导航中。

柔性针的路径规划是一个可逆的过程,理论上针可以从目标靶点沿原路径返回到入针点,因此路径规划也可以分成正向规划和逆向规划。正向规划是规划从入针点到病灶区域的穿刺路径,逆向规划是从病灶区出发,依据针的穿刺可达范围来确定入针点的位置。目前对穿刺针的逆向规划研究主要应用在临床上,用于确定入针位置和角度。哈尔滨理工大学张永德等^[22]研究穿刺针的逆向路径规划,通过优化针的入针区域来优化穿刺过程中的整个路径。

1.2 针-组织力学模型

在针的穿刺过程中,柔性针受到针与组织之间相互的作用力发生形变,产生的形变会影响手术的穿刺精度和效果^[23]。也可以通过控制柔性针的形变来规避手术中的重要血管和神经,因此,建立针-组织之间的力学模型,有利于控制柔性针和规划路径的研究^[24]。通过对变形规律的研究可以采取有效的补偿措施,实现规划过程中的实时补偿,从而减少瞄准误差提高瞄准精度。准确的力学模型是实现有效路径规划的基础,也是提高穿刺精度的方法之一。杜海艳等^[25]通过将穿刺过程视为准静态过程,并进行离散化,得到穿刺过程中柔性针受力由切割力、抵抗力和摩擦力3个部分组成,其中摩擦力只存在针体进入组织之后的部分。不同的针尖结构、针体直径和穿刺速度都会影响摩擦力的大小。

人体软组织是具有各向异性、非线性、弹性和粘性的复杂结构^[26],在针尖挤压下组织达到极限之前,产生弹性形变,极限之后组织结构被破坏产生塑性形变^[27],柔性针穿过的组织如图3所示。在穿刺过程中,软组织发生弹塑性形变,引起目标靶点的偏移,造成穿刺误差。通过建立针-组织的力学模型,可以帮助预测靶点漂移的位

置。构造针-组织之间的力学模型常用的方法是有限元法和质点-弹簧模型^[28],在手术过程中,柔性针要先后经过皮肤、皮下脂肪、肌肉和目标器官等^[29]生理特性不同的组织,这些组织是非均匀的,针插入非均匀组织产生的形变也不同。可使用有限元法对不同组织的形变进行分析,基于有限元法的研究较多,计算量大,适用对实时性要求不高的场景。

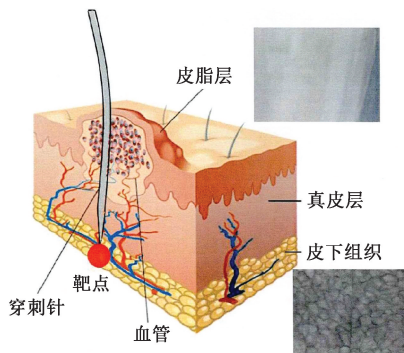


图 3 针穿过不同组织

Fig. 3 Needle passes through different tissues

2015 年 Konh 等^[30]提出了一种新的有限元方法估计针尖在组织中的位置,应用 LS-DYNA 软件中的任意拉格朗日-欧拉法考虑针的固体元素与组织的流体元素之间的相互作用。2017 年,北京理工大学李勖^[19]将柔性穿刺针视为悬臂梁的结构,获得针尖形状和位置的解析函数,依此来预测针尖位置,为路径规划做准备。2018 年,浙江大学黄成等^[31]将穿刺过程分成了 4 个阶段,基于有限元法来建立每个阶段的针与组织之间力学模型,并计算每个阶段穿刺力的参数,根据得到的力学模型规划穿刺针的路径。质点-弹簧模型是离散模型,计算实时性好,但是预定义的约束条件使得模型的精度较低,不适合复杂模型的分析。针对上述两种方法出现的问题,Zhu 等^[32]将有限元和质点-弹簧模型结合起来解决上述问题,提高模型的精度。

1.3 针尖位置定位

在柔性针的整个插入过程,准确的针尖定位是必不可少的,这也是对柔性针进行术中实时规划的重要反馈参数。目前主要利用医学成像设备 CT、MRI 和 US 在针的插入过程提供针尖和靶点的位置。其中基于 US 设备生成的图像显示组织之间的对比度不高^[33],三维超声图像提供了实时针头可视化的方法,但是空间分辨率是有限的,图像中存在各种伪影。基于 CT 的图像质量高^[34],具有更高的组织对比度。为了提高图像目标针尖和周围环境的对比度,研究人员通过曝光融合^[35]和小波增强^[36]等图像处理方法提高 CT 图像的对比度。但是患者会长时间暴露在辐射环境下,对医生和患者都有潜在的风险。

基于 MRI 的图像能够提供最优的组织对比度^[37],常用于穿刺手术中^[38],但是针体某些位置难以和周围组织区分开来,磁共振图像不能直接显示针的几何位置,主要通过具有不同磁共振性质的材料界面处磁化率引起的信号损失来检测位置^[39],存在与磁性材料不兼容的问题。以上成像设备提供的视觉反馈都存在较低的空间和对比度分辨率,准确识别针尖的偏转比较困难。

使用医学图像进行针尖跟踪需要分割图像,图像分割和图像定位被应用于不同的成像设备,用于区分和分割图像中的柔性针和人体组织,但是获取分割后针尖定位的结果需要一定时间,实时效果差,CT 和 MRI 成像的过程是非实时的^[40],对针的控制图像获取,针尖位置校正和针体运动之间交替进行。连续的针尖控制需要获取 US 快速的图像反馈,在 US 图像下的针尖控制是许多工作研究的重点,基于 US 的图像反馈如图 4 所示。

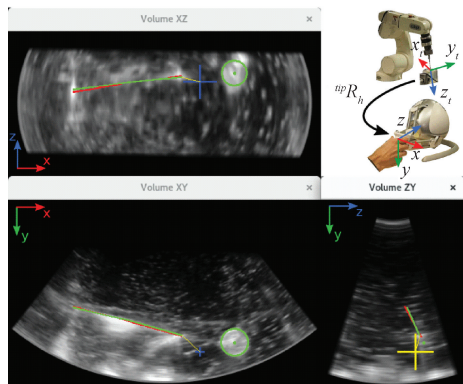


图 4 US 图像反馈^[33]

Fig. 4 US image feedback^[33]

除了使用医学成像设备来获取针尖定位,研究人员提出一种能够在手术过程中对柔性针进行单独跟踪和定位的方法^[41],通过导航设备或者在针尖安装精密的传感器,返回针尖的位置和针体形状等信息。由于柔性针的针尖直径在 0.8 mm 左右,以及柔性针进入人体造成对视线的遮挡,在选择传感器时需要满足可穿透和设备小型的要求。常用的传感器有电磁传感器和 FBG 传感器。电磁传感器可以实现实时的三维空间测量和定位,提供高分辨率的针尖位置反馈,但是电磁传感器在工作环境中的干扰会影响磁场的分布导致定位误差增加,并且环境中金属物质时,也会影响定位的准确性,导致跟踪针尖位置精度降低^[42],电磁传感器也对针的材料敏感。为了克服上述的问题,研究人员提出使用 FBG 传感器来定位针尖的位置,相对于电磁传感器,FBG 在复杂的手术环境下具有更高的精度。

FBG 传感器具有尺寸小、重量轻、抗电磁干扰和易于多路传输的优点,能够检测微小应变,可以直接用于相对

坚固的结构中,不需要增加凹槽或者孔径,已经越来越多地应用在医学应用中,在医学领域中具有巨大潜力。为了向外科医生提供触觉反馈和手术器械的位置,几种灵活的手术工具已经集成了 FBG 以监控器械的形状和位置,当光纤受到机械拉伸或者压缩时,可以通过检测反射波峰值的变化,来计算光栅之间距离的变化,进一步得到手术器械的形状变化和位置信息。基于 FBG 的手术工具目前已经被提出用于组织操纵和消融手术中^[43]。

在穿刺手术中,对柔性针进行路径规划时,为了沿着曲折的解剖路径准确到达手术靶点,使用 FBG 传感器提供针尖实时的位置,减少医学成像设备产生的辐射和延迟,检测的位置用于针头插入控制过程中的反馈。2010 年, Park 等^[44]将光纤嵌入柔性针上的凹槽中,两组传感器位于针头不同的位置, FBG 在针上的形状如图 5 所示能够估算针头弯曲轮廓,该方法的测量精度不够高。2014 年 Sadjadi 等^[45]将电磁传感器和 FBG 传感器融合在一起记录针头的位置,校正路径。Abayazid 等^[46]提出将 FBG 传感器嵌在穿刺针轴上,如图 6 所示,测量施加在针头的应变值来重建针形的方法。重建的针形被用于针转向算法的反馈,提高针转向的精度。2016 年 Guo 等^[47]将三根相距 120° 的光纤埋入针孔内侧,每根光纤携带 3 个 FBG 传感器,依次来确定针的形状。同时结合计算机辅助导航移动引导针尖到达目标点,该方式在各向同性的材料效果较好。

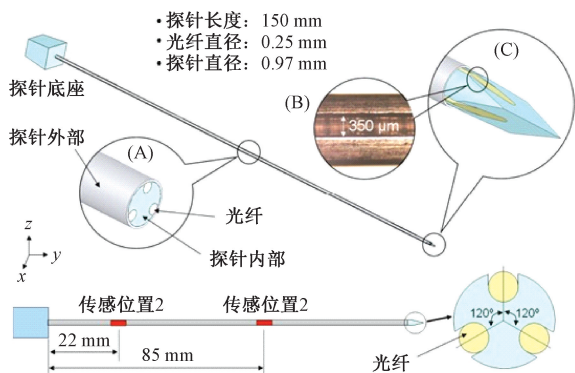


图 5 柔性针嵌入 FBG^[44]

Fig. 5 Flexible needle embedded FBG^[44]

2017 年 Moreira 等^[48]将 MRI 和 FBG 传感器结合起来反馈针尖的位置, MRI 图像检测目标位置, FBG 在插入过程中提供在线的针尖位置,实验表明基于 FBG 的针尖追踪器计算的平均靶向误差为 1.74 mm。2021 年 Ha 等^[49]提出了一种结合电磁跟踪和基于 FBG 的形状感知,荧光透视图像的方法实时可视化导管的形状,融合电磁传感和 FBG 传感提高了三维重建的精度,且不需要连续的透视,减少了患者受辐射的时间。2023 年, Zhang 等^[50]设计了一种集成 5 个 FBG 的柔性针,并提出了一种基于梯

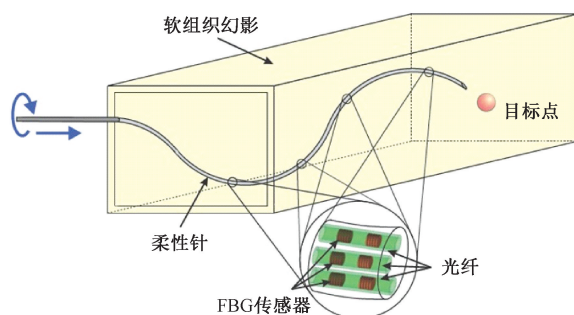


图 6 基于 FBG 重建针形^[46]

Fig. 6 Reconstruction of needle shape based on FBG^[46]

度的优化方法,将该方法应用到 FBG 的形状传感算法中,实验表明计算针尖位置的平均误差为 0.39 mm。

2 柔性针路径规划方法

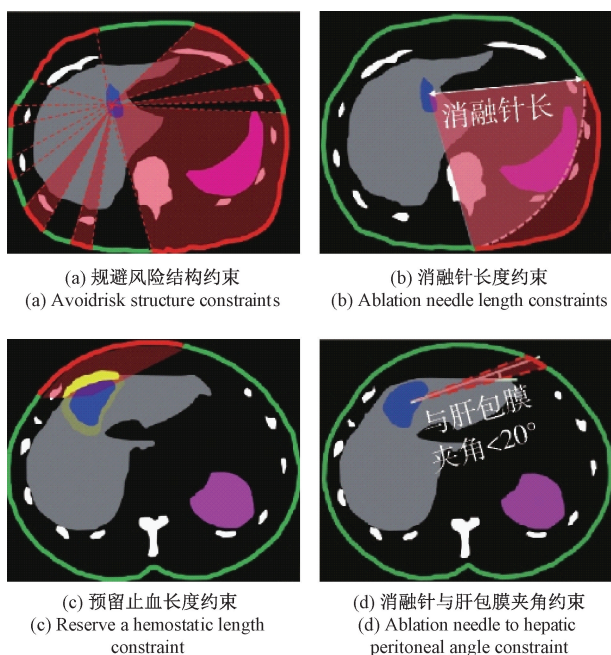
在整个穿刺手术过程中,关键问题在于如何控制柔性针到达目标靶点,同时避开重要的组织。因为目标肿瘤位置和穿刺入针点之间存在重要的血管和神经组织,影响穿刺针的前进,需要更复杂的曲线路径来规避血管,柔性针的路径规划就是解决寻找路径最优解的问题,目前柔性针的路径规划算法按照不同的算法原理可以分成数值法、搜索法和运动反解法。

2.1 基于数值法的路径规划算法

数值法主要分为概率法和目标函数法。概率法是利用数学概率原理来计算穿刺成功率最大的路径,并考虑路径误差的随机性,选择最优路径。目标函数法是在规划前考虑路径的优化指标,如路径最短、与障碍物距离最远和针转向次数最少等指标来创建目标函数,通过计算目标函数得到最优解。概率法和目标函数法规划的路径不保证是最优路径。

张睿等^[51]在综述中总结了路径规划中需要遵循的约束条件,如图 7 所示,也是目标函数需要考虑的指标。2021 年 Bao 等^[52]提出了一种智能活检手术路径规划方法,在设定的多目标函数的基础上,引入了帕累托优化算法,避免了设置人为的风险权重,得到最优手术路径。该算法适用于术前路径规划,不适合在临床环境下应用。2022 年孙峰辉等^[53]提出了一种基于多级约束的路径规划算法,根据患者 CT 图像构建肺部数字化模型,以肿瘤为中心的理想球面上构造斐波那契网络采样,得到初始可行路径。根据物理约束,生理约束和数理约束进一步选择路径,该算法可以有效规避骨骼等风险组织。

基于数值法的路径规划通常需要经过大量的计算来获得更高的精度,这种方法不适合应用在复杂环境中,尤

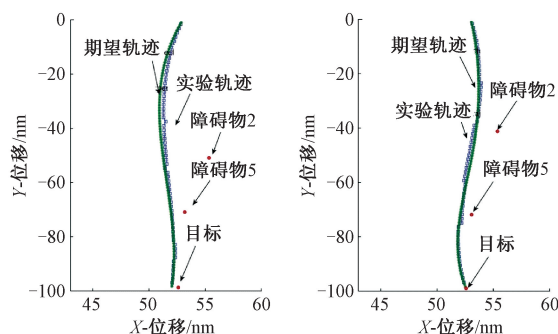
图 7 多级约束^[51]Fig. 7 Multi-level constraints^[51]

其包含多种不规则障碍物的临床手术中,适合应用在具有规则形状的障碍物的环境中。经皮穿刺手术中需要避开的血管和重要组织的形状通常是不规则的,数值法在肺部手术中应用的精度较低。

2.2 基于搜索法的路径规划算法

搜索法是根据穿刺针路径规划的特点,利用人工智能算法来搜索可行的路径,搜索法可以搜索出所有可行的路径,但是不保证路径的最优。人工势能场、粒子群优化算法和快速遍历随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 算法是搜索法中常用的算法。

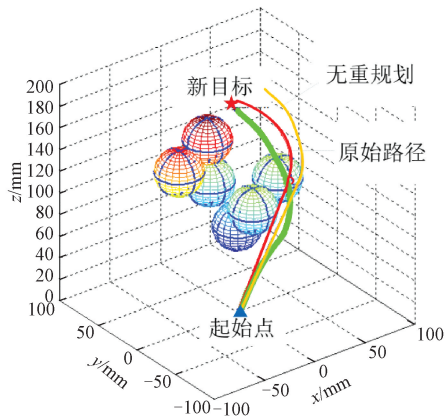
人工势能场将目标靶点视为对穿刺针有引力,障碍物对穿刺针有斥力,在规划时容易陷入局部最小。2020 年浙江大学 Li 等^[54]采用有限元模型描述针与组织的相互作用来实时预测目标和障碍物的位移,并利用人工势能场来定义插入误差,将动态的路径规划转成优化插入误差的问题,实验结果如图 8 所示,在每次计算迭代中实时更新当前针尖的位置来调整路径。实验通过摄像机实时拍摄来获取针轨迹和运动的,在患者体内难以实现。2022 年 Min 等^[55]设计了一种多阶段穿透路径规划算法,该算法量化不同的临床多约束条件,根据硬约束初始化可行路径,之后根据增加重力附加势能的人工势能场来计算第二阶段的路径,提供了一种获取穿刺路径的新方法。但是该方法没有考虑呼吸引起的器官变形等影响,一定程度上影响了穿刺效果。人工势能场方法一般是离线使用的,用于术前规划。

图 8 人工势能场算法^[54]Fig. 8 APF algorithm^[54]

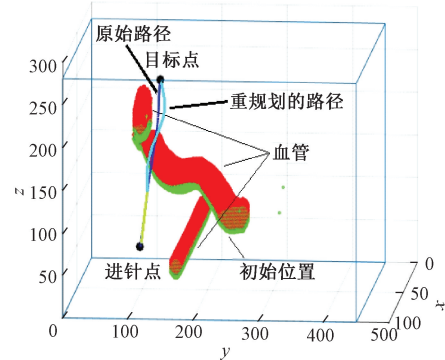
粒子群优化算法也是路径规划中常用的搜索算法,2018 年,郑州大学 Huo 等^[56]提出一种检测针尖位置的路径规划算法,多目标粒子群算法规划的是对应可行路径的控制序列,而不是规划插入路径,该方法规划的路径具有较高的精度。路径规划方法需要在一次穿刺插入中多次执行,降低了计算的效率。Cai 等^[57]基于等曲率的路径形式,改进了粒子群优化算法,路径中的圆弧圆心角值和针体旋转角值两个变量作为粒子,通过计算迭代得到最优的路径。2022 年 Zhen 等^[58]提出一种自适应的粒子群优化算法,算法中增加了惯性权重系数的部分。在算法迭代过程中,不断更新权重系数解决算法陷入局部最优的问题。相对于传统的粒子群优化算法,该算法规划速度快,精度提高了 10 倍。同年,该团队^[59]还提出了基于蜂群学习的粒子群优化算法和三维空间回缩针策略的路径规划方法,该方法在多目标规划上具有更高的规划精度和更短的距离。

RRT 算法可以实现实时的路径规划,是术中路径规划常用的算法,在路径规划中应用广泛。2019 年杨吉超^[60]提出一种基于 RRT 算法的实时规划算法,在 RRT 算法的基础上引入可达引导和贪婪启发策略,根据超声成像反馈的柔性针轨迹和位置实时调整路径,提高了路径的搜索效率和准确度,仿真结果如图 9(a)所示。王元征^[61]在杨吉超算法的基础上,结合旧点跟踪策略和极端趋势扩展策略,改进 RRT 算法规划路径,并根据穿刺针的特性构建代价函数,从而确定最优穿刺路径,该模型可以为临床治疗提供实时针尖轨迹预测信息,改进的结果如图 9(b)所示。2020 年 Afsoon 等^[62]提出了一种基于启发式的 RRT 规划算法,该算法可以实现多目标靶点的规划,不需要重新定向和重插入针,仿真实验如图 9(c)所示,结果表明最大瞄准误差为 1 mm。Zhang 等^[63]将 RRT 算法与人工势能场算法结合起来规划路径,该算法提出了一种新的基于三维空间变换和柔性针运动约束的节点生成策略,考虑人工势能场的影响因素以减少穿刺过程中障碍物的影响,提高了算法的安全性。2022 年姜金^[64]

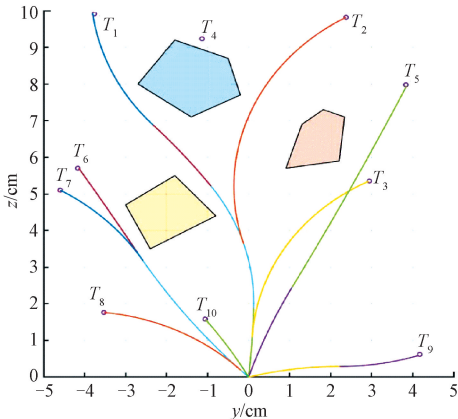
在 RRT 算法的基础上,在其剪枝优化过程中添加了基于多曲率特征的路径拟合,并基于路径长度来优化穿刺路径。该算法的收敛速度优于传统的 RRT 算法 8.8%,路径长度优于传统 RRT 算法 21%。



(a) 杨吉超的改进RRT算法^[60]
(a) Yang Jichao's improved RRT algorithm^[60]



(b) 王元征的改进RRT算法^[61]
(b) Wang Yuanzheng's improved RRT algorithm^[61]



(c) Afsoon等的RRT算法^[62]
(c) Afsoon et al.'s RRT algorithm^[62]

图9 RRT 路径规划算法
Fig. 9 RRT algorithm

除了上述的3种方法,遗传算法也是搜索法中常用的算法,遗传算法与RRT算法相比,能够有效的避免算法陷入局部最优。2021年李沐蓉等^[65]提出一种基于迭

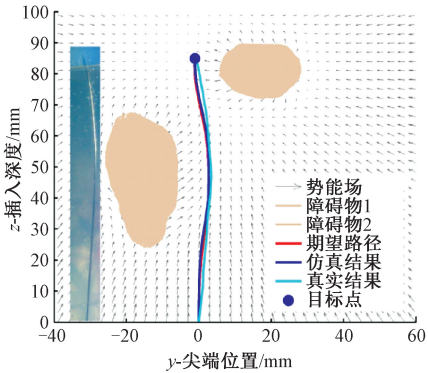
代学习的针尖轨迹规划算法,首先依据针尖的可达域生成初始路径集,然后基于遗传退火算法选择最优路径,最后根据针-组织相互作用模型和迭代学习算法修正路径。同年,王林泽等^[66]基于针-组织的力学模型,建立一种基于BP神经网络的预测模型,预测穿刺过程中的针尖轨迹。预测的误差控制在2mm以内。

但是上述的搜索算法确定的路径可能碰到障碍物,导致最终位置偏移目标靶点,算法的实时更新能力还需要进一步提高。搜索算法理论上是一种相对较快的算法,适用于有不规则障碍物的复杂环境中,因此适合临床手术。

2.3 基于运动反解法的路径规划算法

反解法是在给定入针点和穿刺靶点的情况下,利用运动学反解计算可行的路径,但是反解法不能保证有解,基于反解法的路径规划算法较少,Duindan等^[67]将柔性针运动视为具有恒定速率和俯仰角的运动,提出了一种基于逆运动学的运动规划算法,针尖运动带动针体运动,实现路径规划,该算法规划的是二维环境下的路径。反解法规划路径最为直接,但是无法有效的避开手术环境中的障碍物。

现有的路径规划算法大多应用在几何环境和静态环境中,动态环境下的路径规划应用较少。2017年Li等^[68]基于路径跟踪对穿刺路径实时规划,通过修正针尖的转向误差和交叉轨迹误差来跟踪路径,结合离散势场算法来规划变曲率路径,仿真结果如图10(a)所示,误差可达到1.15mm,算法能够提高瞄准目标的精度。2020年Lin等^[69]基于人体的呼吸运动,提出了一种动态的路径规划方法,基于获取的4DCT图像构建患者的呼吸运动模型,动态规划模型如图仿真结果如图10(b)所示。根据模型调整针的路径,平均精度在1.34mm,减少呼吸运动对穿刺准确度的影响。2022年Zhang等^[70]提出将术中实时规划和闭环跟踪控制相分离的方法来规划术中的路径,术中实时规划补偿目标和障碍物的漂移,闭环跟踪控制补偿针尖的跟踪误差,仿真结果如图10(c)所示。该算法与其他重规划算法相比,在手术环境具有更好的鲁棒性。



(a) Li等^[68]路径跟踪方法
(a) Li et al.'s^[68] path tracking method

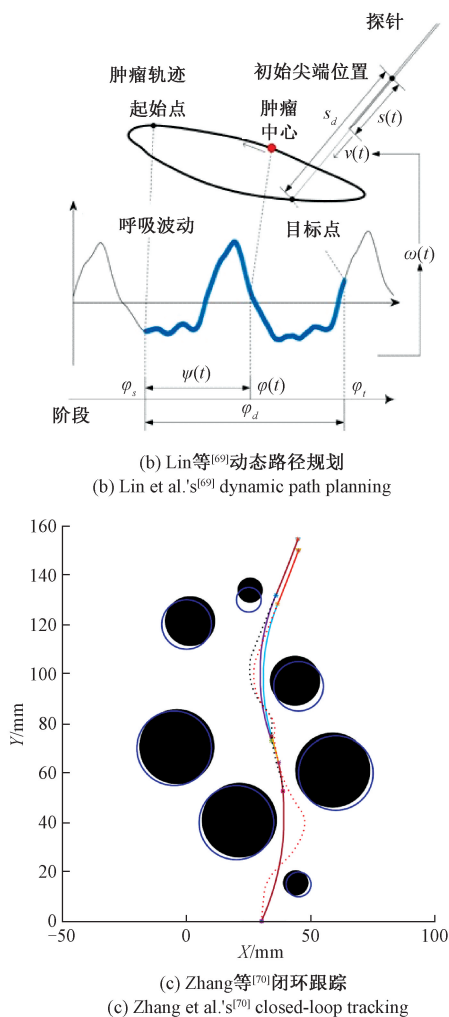


图 10 动态路径规划

Fig. 10 Dynamic path planning

研究人员将路径规划问题视为数学的优化问题,通过最小化代价函数来获取优化问题的最优解,现有的规划方法主要规划等曲率的路径形式,对于其他形式的路径,这些算法将减少路径选择的多样性。

3 发展趋势

目前对柔性针路径规划的研究还在仿真阶段,应用到临床上还需要很长一段时间,缺乏足够的理论知识和实验数据,影响路径规划的应用主要有 3 个因素:1)大部分研究人员规划路径时将手术环境视为线性、均匀的环境,柔性针运动模型的建立是基于上述环境的。2)需要实时获取当前柔性针的形状和针尖位置等参数信息。3)术中规划过程中,患者的呼吸等生理运动引起的穿刺环境发生实时变化的问题。从这 3 项影响因素出发,分析柔性针路径规划中存在的问题。

3.1 术中路径规划的最优路径

当前对柔性针的路径规划是基于静态环境中的,仿真设置的实验环境与手术环境相差较大,算法应用在临床上健壮性和实时性会降低,得到的穿刺路径形式也较为单一,以等曲率和变曲率路径为主要规划的路径形式,算法求得的最优解也是基于特定路径的。并且常用的路径规划算法尚未考虑穿刺入针角度和方向对路径规划的影响,这些因素限制了路径规划在临床上的应用。

目前建立更符合手术环境的仿真实验环境,如何在符合手术环境的多种路径形式下规划路径,并考虑入针角度和方向以获得最优路径和最少穿刺成本将是接下来的研究热点。

3.2 术中实时路径规划的参数反馈

术中实时规划需要获取针尖实时位置、针尖受力等相关信息,作为后续修正路径的反馈信息。基于术中医学图像检测柔性针的形状和针尖位置需要大量的数据,并且在实时检测速度上还需要提升。使用深度学习算法可能会提升检测速度,通过提取医学图像中的空间特征和历史柔性针的路径时间特征等信息,连续输出柔性针针尖的局部路径,实现自动规划柔性针的路径。

使用 FBG 传感器获取柔性针位置和针体形状也是目前研究的热点,FBG 传感器具有良好的敏感度、抗电磁干扰、可重复性等优点。但是 FBG 传感器不同的排布方式,不同的柔性针结构和手术部位都会影响传感器的重建精度,传感器的集成可能需要不同的工艺,是当前研究的难点。

此外,除了以穿刺位置作为术中实时规划的反馈,手术过程中的受力大小也可以作为反馈值。基于 FBG 检测穿刺手术力的大小难以兼顾温度灵敏度、力分辨率和机械强度等问题。目前,在穿刺手术中尚未能同时检测穿刺力的大小和针的位置,以及实时反馈穿刺力的大小,都是目前需要解决的问题。

FBG 传感器集成化、优化光纤的形状传感算法、将力反馈和形状传感结合起来作为路径规划中的反馈参数,是接下来传感器优化的发展方向。

3.3 术中实时路径规划

目前的术中规划基本上是在术前规划的基础上对路径进行实时规划,解决的是目标和障碍物漂移引起的误差,术中实时规划通常基于针-组织之间的作用结合患者的呼吸运动来调整路径,仿真规划结果能够达到误差小于 1 mm 的精度。在基于针尖位置或者针-组织之间相互作用来对柔性针规划,没有考虑呼吸运动对目标和障碍物的影响。并且常用的路径规划算法均是基于有限元模型和质量-弹簧模型的,目前构建的针-组织之间的模型没有完全符合手术中的实际环境,这成为路径规划急需

解决的问题。并且建立的呼吸模型由于患者之间存在差异性,模型在考虑呼吸的时候,通常没有考虑针-组织之间的相互作用,针对性较强,无法扩展应用到大部分患者身上。建立更符合实际的针-组织交互模型和呼吸模型是未来的发展方向。

除此之外,在术中路径规划中,还需要考虑柔性针本身的结构,优化柔性针的结构提高柔性针的控制精度。考虑柔性针的控制策略来补偿针尖的跟踪误差。现有的柔性针的控制输入是基于医学成像设备的,不适用于临床环境,后续可以将针轨迹检测算法或者高精度的传感器应用到控制输入中,提高柔性针的控制精度。

4 结 论

柔性针的路径规划是通过寻找术中穿刺针的最优路径,合理避开人体组织等障碍物,准确到达目标位置的运动过程。路径规划的精度直接影响了手术的成功率,也决定了其在临床的实际应用。本文通过对柔性针的路径规划算法研究现状和发展趋势进行了总结和分析,讨论了算法精度的影响因素,总结了目前穿刺手术中常用路径规划算法的优缺点,最后从影响路径规划的因素出发,给出了路径规划算法存在的问题和发展方向。当前柔性针路径规划算法正朝着实时、准确、动态和高精度的方向发展。

参考文献

- [1] 王乃堃, 骆敏舟, 陆丽娟. 穿刺机器人在微创外科手术中的应用进展[J]. 中国疼痛医学杂志, 2020, 26(5): 376-380.
WANG N K, LUO M ZH, LU L J. Application progress of puncture robot in minimally invasive surgery [J]. Chinese Journal of Pain Medicine, 2020, 26 (5): 376-380.
- [2] 倪自强, 王田苗, 刘达. 医疗机器人技术发展综述[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 45-52.
NI Z Q, WANG T M, LIU D. Review of medical robot technology development [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 45-52.
- [3] 刘隽怡, 潘清波. 浅析癌症现状以及抗癌药物的发展与前景[J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(26): 103-105.
LIU J Y, PAN Q B. Analysis of the status quo of cancer and the development and prospect of anticancer drugs[J]. Digest of the Latest Medical Information in the World, 2019, 19(26): 103-105.
- [4] 段星光, 温浩, 何睿, 等. 胸腹腔经皮穿刺机器人研究进展及关键技术分析[J]. 机器人, 2021, 43(5): 567-584.

- DUAN X G, WEN H, HE R, et al. Advances and key techniques of percutaneous puncture robots for thorax and abdomen[J]. Robot, 2021, 43(5): 567-584.
- [5] 李霞. 机器人辅助柔性针软组织穿刺系统研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2016.
LI X. Robot-assisted flexible needle soft tissue puncture system research[D]. Xiangtan:Xiangtan University, 2016.
- [6] DONDER A, BAENA F R. 3-D path-following control for steerable needles with fiber Bragg gratings in multi-core fibers [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2022, 70(3): 1072-1085.
- [7] TAN X, YU P, LIM K B, et al. Robust path planning for flexible needle insertion using Markov decision processes[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2018, 13(9): 1439-1451.
- [8] 王建军. 手术针穿刺软组织的建模及路径规划研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013.
WANG J J. Modeling and path planning of soft tissue puncture with surgical needle [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [9] 华栋. 面向机器人辅助泌尿系穿刺手术的柔性针运动规划和呼吸运动补偿方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.
HUA D. Research on flexible needle motion planning and respiratory motion compensation method for robot-assisted urinary puncture surgery [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [10] 孔德聪. 柔性针穿刺系统路径规划方法研究[D]. 沈阳:东北大学, 2014.
KONG D C. Research on path planning method of flexible needle puncture system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [11] 赵新刚, 杨唐文, 韩建达, 等. 机器人辅助针穿刺技术[J]. 科学通报:中文版, 2014, 58(S2): 20-27.
ZHAO X G, YANG T W, HAN J D, et al. Robot-assisted needle puncture technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 58(S2): 20-27.
- [12] 李泽群. 近距离放疗穿刺机器人系统关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
LI Z Q. Research on key technologies of brachytherapy puncture robot system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [13] 冯如然, 唐翎, 俄木依欣, 等. 基于CT图像的肺穿刺术路径规划系统[J]. 机器人, 2022, 44(6): 694-707.
FENG R R, TANG L, E M Y X, et al. Path planning system of lung puncture based on CT image[J]. Robot, 2022, 44(6): 694-707.

- [14] 贺长斌, 袁惠, 茹小莉, 等. CT 导引下经皮肺穿刺活检术及临床价值[J]. 医学信息, 2012, 25(5): 332.
HE CH B, YUAN H, RU X L, et al. CT-guided percutaneous lung biopsy and its clinical value get the original text [J]. Medical Information, 2012, 25(5): 332.
- [15] 姜官武. 基于医学图像的辅助精准穿刺机器人关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
JIANG G W. Based on medical image aided precision targeted key techniques of robot[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [16] 中国抗癌协会肿瘤介入专业委员会, 中国抗癌协会肿瘤介入专业委员会胸部肿瘤诊疗专家委员会. 胸部肿瘤经皮穿刺活检中国专家共识(2020 版)[J]. 中华医学杂志, 2021, 101(3): 185-198.
Interventional Oncology Branch of China Anti-Cancer Association, Thoracic Tumor Diagnosis and Treatment Branch of the interventional Oncology Branch of the China Anti-Cancer Association. Clinical practice guideline for percutaneous transthoracic needle biopsy: A consensus statement and recommendations (2020 updated) [J]. National Medical Journal of China, 2021, 101(3): 185-198.
- [17] 王力黎. 新型斜角柔性针的设计及穿刺轨迹规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
WANG L Y. Design of a new type of oblique angle flexible needle and study on puncture trajectory planning [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [18] BABAIASL M, YANG F, SWENSEN J P. Duty cycling of waterjet can improve steerability and radius-of-curvature (ROC) for waterjet steerable needles [C]. International Symposium on Medical Robotics, 2020: 50-56.
- [19] 李勖. 穿刺手术机器人穿刺针-软组织交互机理、规划控制及感知技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
LI M. Research on the interaction mechanism, planning control and perception technology of needle-soft tissue interaction in the puncture surgery robot [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [20] 赵燕江, 张艳华, 陈浩, 等. 多种路径形式组合的柔性针二维路径优化 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(1): 6-10.
ZHAO Y J, ZHANG Y H, CHEN H, et al. 2D path optimization for flexible needle based on combination of multiform paths [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(1): 6-10.
- [21] ZHAO Y, QI H, LI D, et al. Biopsy needle puncture path planning method based on 3D ultrasound images [C]. 2018 14th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), 2018.
- [22] 张永德, 赵燕江, 涂飞, 等. 柔性针穿刺路径规划综述[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(4): 7-11.
ZHANG Y D, ZHAO Y J, TU F, et al. Review of flexible needle puncture path planning [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(4): 7-11.
- [23] VAN GERWEN D J, DANKELMAN J, VAN DEN DOBBELSTEEN J J. Needle-tissue interaction forces—a survey of experimental data [J]. Medical Engineering & Physics, 2012, 34(6): 665-80.
- [24] 薛丽. 面向手术机器人针穿刺的虚拟力反馈装置设计与控制 [D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
XUE L. Design and control of virtual force feedback device for needle puncture of surgical robot [D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [25] 杜海艳, 张永德, 赵燕江, 等. 斜尖针穿刺软组织建模及针尖轨迹预测 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1744-1751.
DU H Y, ZHANG Y D, ZHAO Y J, et al. Modeling of bevel-tipped needle inserting into soft tissue and estimation of needle tip trajectory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1744-1751.
- [26] BARUA R, DATTA R, DATTA P, et al. Experimental analysis the tissue deformation of needle insertion process in tissue engineering [C]. IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering, 2020: 83-85.
- [27] DIMAIO S P, SALCUDEAN S E. Interactive simulation of needle insertion models [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2005, 52(7): 1167-1179.
- [28] 高德东, 郑浩峻, 姚望, 等. 基于虚拟弹簧模型的柔性针穿刺仿真研究 [J]. 计算机工程, 2010, 36(18): 273-275.
GAO D D, ZHENG H J, YAO W, et al. Flexible needle puncture simulation based on virtual spring model [J]. Computer Engineering, 2010, 36(18): 273-275.
- [29] BUTNARIU S, GÎRBACIA T, GÎRBACIA F. An analysis on tissue deformation during robotic biopsy needle insertion [C]. E-Health and Bioengineering Conference, 2017: 213-216.
- [30] KONH B, HONARVAR M, DARVISH K, et al. Simulation and experimental studies in needle-tissue interactions [J]. Journal of Clinical Monitoring and Computing, 2017, 31(4): 861-872.
- [31] 黄成. 机器人辅助柔性针穿刺的路径规划研究 [D].

- 杭州:浙江大学, 2018.
- HUANG CH. Path planning study of robot-assisted flexible needle puncture [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [32] ZHU B, GU L. A hybrid deformable model for real-time sur-gical simulation[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2012, 36(5): 356-365.
- [33] ABBASS M, FAN S, BARKER K, et al. Real-time mechanical-encoding of needle shape for image-guided medical and surgical interventions [J]. Journal of Medical Devices-Transactions of the ASME, 2019, 3(13): 1-9.
- [34] YUNG F K, MING T A S, SYADAD B S M, et al. Phantom and animal study of a robot-assisted, CT-guided targeting system using image-only navigation for stereotactic needle insertion without positional sensors[J]. Journal of Vascular and Interventional Radiology, 2022, 33(11): 1416-1423.
- [35] 史韶杰, 韩建宁, 李大威, 等. 基于多尺度曝光融合的医学 CT 图像增强方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 106-111.
- SHI SH J, HAN J Y, LI D W, et al. Medical CT image enhancement method based on multi-scale exposure fusion[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (6): 106-111.
- [36] 牟海维, 段朝辉, 韩建, 等. 基于多视小波变换融合的医学 CT 图像增强方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(9): 122-127.
- MU H W, DUAN ZH H, HAN J, et al. Medical CT image enhancement method based on multi-view wavelet transform fusion [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(9): 122-127.
- [37] 李杰文, 叶俊勇, 徐胜生, 等. 特征迁移结合主动标注的颅内病变鉴别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9): 186-194.
- LI J W, YE J Y, XU SH SH, et al. Identification of intracranial lesions based on feature transfer and active labeling [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(9): 186-194.
- [38] LONG J A, HUNGR N, BAUMANN M, et al. Development of a novel robot for transperineal needle based interventions: Focal therapy, brachytherapy and prostate biopsies [J]. Journal of Urology, 2012, 188(4): 1369-1374.
- [39] MEHRTASH A, GHAFOORIAN M, PERNELLE G, et al. Automatic needle segmentation and localization in MRI with 3-D convolutional neural networks: Application to MRI-targeted prostate biopsy[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38(4): 1026-1036.
- [40] CHEVRIE J, KRUPA A, BABEL M. Real-time teleoperation of flexible beveled-tip needle insertion using haptic force feedback and 3D ultrasound guidance[C]. International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019.
- [41] 毕津滔, 张永德, 孙波涛. 基于电磁跟踪与超声图像的介入机器人穿刺导航方法及实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 253-262.
- BI J T, ZHANG Y D, SUN B T. Puncture navigation method and experiment study of interventional robot based on electromagnetic tracking and ultrasound image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 253-262.
- [42] 王可. 基于矩形环流电磁定位的肺穿刺活检针定位系统研究[D]. 成都:四川大学, 2021.
- WANG K. Study on lung aspiration biopsy needle positioning system based on rectangular circulation electromagnetic localization [D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.
- [43] PRESTI D L, MASSARONI C, LEITÃO C S J, et al. Fiber Bragg gratings for medical applications and future challenges: A review [J]. IEEE ACCESS, 2020(8): 156863-156888.
- [44] PARK Y, ELAYAPERUMAL S, DANIEL B, et al. Real-time estimation of three-dimensional needle shape and deflection for MRI-guided interventions [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(6): 906-915.
- [45] SADJADI H, HASHTRUDI-ZAAD K, FICHTINGER G. Needle deflection estimation: Prostate brachytherapy phantom experiments [J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2014, 9(6): 921-929.
- [46] ABAYAZID M, KEMP M, MISRA S. 3D flexible needle steering in soft-tissue phantoms using fiber Bragg grating sensors[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013.
- [47] GUO J Z, AZIMI E, GONENC B, et al. MRI-guided needle steering for targets in motion based on fiber Bragg grating sensors[C]. IEEE Sensors, 2016.
- [48] MOREIRA P, BOSKMA K J, MISRA S. Towards MRI-guided flexible needle steering using fiber Bragg grating-based tip tracking[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017.
- [49] HA X T, OURAK M, AL-AHMAD M, et al. Robust catheter tracking by fusing electromagnetic tracking, fiber Bragg grating and sparse fluoroscopic images[J]. IEEE

- Sensors Journal, 2021, 21(20): 23422-23434.
- [50] ZHANG L, LI C L, DONG H J, et al. Fiber Bragg grating-based sensor system for sensing the shape of flexible needles[J]. Measurement, 2023(206): 1-14.
- [51] 张睿, 周著黄, 吴薇薇. 肝肿瘤热消融治疗穿刺路径规划算法研究综述[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(11): 1300-1314.
- ZHANG R, ZHOU ZH H, WEI W W. Review of needle trajectory planning algorithms for liver tumor thermal ablation[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(11): 1300-1314.
- [52] BAO N, CHEN Y Y, LIU Y, et al. Multi-objective path planning for lung biopsy surgery[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021(81): 36153-36170.
- [53] 孙峰辉, 裴宏亮, 杨逸飞, 等. 一种基于多级约束的肺部穿刺路径规划方法[J]. 生物医学工程学杂志, 2022, 39(3): 462-470.
- SUN F H, PEI H L, YANG Y F, et al. A lung puncture path planning method based on multi-level constraints [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2022, 39 (3): 462-470.
- [54] LI M R, GAO D D, LEI Y, et al. Dynamic Path planning for bevel-tip flexible needle insertion into soft tissue based on a real-time finite element model [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(6): 1-13.
- [55] MIN L, JIANG H, SHI T. Multi-stage puncture path planning algorithm of ablation needles for percutaneous radio frequency ablation of liver tumors[J]. Computers in Biology and Medicine, 2022(145): 1-12.
- [56] HUO B Y, ZHAO X G, HAN J D, et al. Closed-loop control of bevel-tip needles based on path planning[J]. Cambridge University Press, 2018, 36(12): 1-17.
- [57] CAI C X, SUN C S, HAN Y, et al. Clinical flexible needle puncture path planning based on particle swarm optimization [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2020(193): 1-8.
- [58] ZHEN T, LIANG H G, ZHANG D, et al. Path planning of surgical needle: A new adaptive intelligent particle swarm optimization method [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022, 44 (4): 766-774.
- [59] ZHEN T, ZHANG D, LIANG H G, et al. A new path planning method for bevel-tip flexible needle insertion in 3D space with multiple targets and obstacles[J]. Control Theory and Technology, 2022, 20(4): 525-535.
- [60] 杨吉超. 基于针体识别和针尖位姿预测的柔性针轨迹控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- YANG J CH. Flexible needle trajectory control based on needle body recognition and needle tip posture prediction [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [61] 王元征. 基于超声图像引导的穿刺探针动态穿刺路径规划[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WANG Y ZH. Dynamic puncture path planning of puncture probe based on ultrasound image guidance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [62] AFSOON N A, PETER L X P. A novel path planner for steerable bevel-tip needles to reach multiple targets with obstacles[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 7636-7645.
- [63] ZHANG Y K, QI ZH, ZHANG H. An improved RRT * algorithm combining motion constraint and artificial potential field for robot-assisted flexible needle insertion in 3D environment [C]. 2021 3rd International Conference on Industrial Artificial Intelligence, 2021.
- [64] 姜金. 面向靶向穿刺的多曲率柔性探针驱动装置及路径规划研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- JIANG J. Research on multi-curvature flexible probe drive device and path planning for targeted puncture[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [65] 李沐蓉, 雷勇, 黄成, 等. 基于迭代学习算法的柔性针轨迹规划 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (11): 128-137.
- LI M R, LEI Y, HAUNG CH, et al. Flexible needle path planning based on the iterative learning algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(11): 128-137.
- [66] 王林泽, 高德东, 白辉全, 等. 基于力视感知的斜尖柔性针轨迹预测[J]. 机械工程学报, 2021, 57(11): 52-60.
- WANG L Z, GAO D D, BAI H Q, et al. Trajectory prediction of bevel-tip flexible needle based on force and vision perception [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(11): 52-60.
- [67] DUINDAM V, XU J, ALTEROVITZ R, et al. Three-dimensional motion planning algorithms for steerable needles using inverse kinematics [J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(7): 789-800.
- [68] LI P, JIANG S, LIANG D, et al. Modeling of path planning and needle steering with path tracking in anatomical soft tissues for minimally invasive surgery[J]. Medical Engineering and Physics, 2017(41): 35-45.
- [69] LIN W, SHAN J, ZHI Y Y, et al. A CT-guided robotic needle puncture method for lung tumours with respiratory motion[J]. Physica Medica, 2020(73): 48-56.
- [70] ZHANG B L, SHAO S P, LEI L, et al. Curve fitting-

based dynamic path planning and tracking control for flexible needle insertion [J]. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, 2022, 4(2): 436-447.

作者简介



张帆,2020 年于北京服装学院获得工学学士学位,现为北京信息科技大学硕士研究生,主要研究方向为光纤传感及其应用。

E-mail: 18811177169@163.com

Zhang Fan received her B. Sc. degree from Beijing Institute of Fashion Technology in 2020. She is currently a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include optical fiber sensing and its application.



何彦霖(通信作者),2011 年于兰州交通大学获得工学学士学位和文学学士(双学位),2018 年于北京理工大学获得博士学位,现为北京信息科技大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为光纤传感及其应用、智能材料微型机器人等。

E-mail: heyanlin@bistu.edu.cn

He Yanlin (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2011, and received her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2018. She is currently an associate professor and a master advisor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include optical fiber sensing and its application, intelligent material micro robot, etc.