DOI: 10.3901/JME.2020.01.009

基于复位路径包络误差和改进人工势力场法的复位机器人安全策略*

雷静桃¹ 王 洋¹ 程利亚¹ 胡 磊² 王田苗²

(1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200444;

2. 北京航空航天大学机械工程学院 北京 100191)

摘要: 针对机器人辅助骨折复位操作中的人机协同手术安全问题, 提出一种基于复位路径包络误差和改进人工势力场的复位安全策略。根据 CT 扫描数据, 采用逆向建模构建骨折的 3D 数字化模型, 采用 A* 搜索算法规划避障复位路径。基于临床手术精度要求和术前规划的复位路径, 在所规划的复位路径周围构建包络误差面, 提出改进的人工势力场法, 以无数个包络圆形成的包络误差面建立斥力场, 在骨折近端断面处建立引力场, 引导复位机器人进行骨折复位, 保证机器人辅助骨折复位手术操作被限定于复位路径的包络误差范围内。对基于复位路径包络误差的机器人复位安全策略进行仿真验证, 针对骨折复位路径无障碍、有障碍两种情况, 分别进行复位操作安全策略的仿真分析。仿真结果表明采用包络误差和改进人工势力场的安全策略时, 复位路径完全落在包络误差所限定的范围内, 能较好地避开障碍物, 且仿真路径与规划路径非常接近, 能有效提高机器人复位操作的安全性和精准性。

关键词: 骨折; 复位机器人; 路径规划; 包络误差; 改进人工势力场; 安全策略

中图分类号: TP242

Safety Strategy of Fracture Reduction Robot Based on the Envelope Error of Reduction Path and Improved Artificial Force Field Method

LEI Jingtao¹ WANG Yang¹ CHENG Liya¹ HU Lei² WANG Tianmiao²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444;

2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: Aiming at the safety of human-computer cooperative surgery in the robot-assisted long bone fracture reduction operation, a safety strategy of fracture reduction robot is proposed and is based on the envelope error of reduction path and improved artificial force field method. According to the patient's CT scan data, the 3D digital model of the fracture is constructed by reverse modeling, and the A* search algorithm is used to plan the obstacle avoidance reduction path. Based on the clinical surgical accuracy requirements and planned reduction path, an envelope error surface is constructed around the planned reduction path, and an improved artificial force field is proposed. A repulsive field is established on the envelope error surface formed by the countless enveloping circle, and a gravitational field is established at the end of the long bone. Then, the reduction robot is guided to perform a fracture reduction, and the operation of the robot-assisted fracture reduction operation is limited to the envelope error range of the planned path. The safety strategy of reduction robot based on the envelope error of reduction path is simulated for verification. For two situations of the fracture reduction path no obstacles and the obstacles situation, the simulation of the safety strategy of the reduction operation is carried out, respectively. Simulation results show that adopting the safety strategy based on the envelope error and the improved artificial force field method can ensure the reduction path completely fall within the range defined by the envelope error, which can completely avoid the obstacle, and the simulation path is very close to the planned path, which can effectively improve the safety and precision of the reduction robot operation.

Key words: fracture; reduction robot; path planning; envelope error; improved artificial force field; safety strategy

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1304202)。20190226 收到初稿,
20190711 收到修改稿

0 前言

近年来,国内外关于机器人辅助微创外科手术系统的研发日益活跃^[1],与传统手术相比,外科机器人辅助手术的微创化、精准性等优点,使其有广泛的应用前景。

骨折作为人体常见的损伤形式之一,其临床治疗方法主要为切开复位和髓内钉内固定技术,切开复位存在医生操作强度大、术后感染率高和不易愈合等缺点。髓内钉内固定技术容易使医生在术中受到 X 射线辐射,且难以实现精确复位^[2]。

近年来,采用医疗机器人代替医生为患者提供微创、精准、安全有效的机器人辅助骨折复位手术受到学者的广泛关注^[2]。机器人辅助复位手术是术前对机器人的复位路径进行规划,将骨折后断裂错位的骨骼恢复到正常解剖位置,在骨愈合过程中不发生错位。机器人辅助骨折手术,能精确定位,提高骨折复位的精准度,减少手术创伤从而使患者快速恢复。

骨折复位机器人虽具备智能化、精确性、稳定性等基本特性,然而由于临床手术环境复杂且具有不确定性,骨折复位机器人并不能智能处理临床突发情况,一旦出现某种意外情况,如果没有预先引入相应的安全机制,将会导致复位操作失误,甚至会造成血管神经软组织损伤等严重后果^[3]。

手术机器人的安全性至关重要,需要采取若干安全策略提高其安全性。国内外广泛开展了基于虚拟夹具的安全策略研究。1993 年斯坦福大学 ROSENBERG 提出虚拟夹具的概念,虚拟夹具只与操作者进行交互,是一种作用在遥操作系统中主操作端工作空间上的抽象传感数据,通过虚拟夹具对主操作端的约束实现对机器人的运动空间的限制,并将力觉和听觉型虚拟夹具应用于遥操作轴孔装配试验,结果表明能提高 70% 的操作效率^[4]。PANADDA 等^[5-6]将虚拟夹具应用于人机协同机器人系统,利用卡尔曼滤波器采集视觉及位置传感器的测量数据对机器人末端位姿进行估计,实现机器人对期望轨迹的跟踪。PARK 等^[7]将虚拟夹具引入医疗外科领域,通过 CT 数据获取病灶位置,然后将虚拟夹具按照外科医生的指令将机器人的运动约束到与病灶位置相邻的适当路径,结果表明采用虚拟夹具的机器人执行手术的效率和精准度比医生执行手术的效率和精准度更高。NAKAZAWA 等^[8]将虚拟夹具用于脑神经外科手术,虚拟夹具通过操纵器在大脑内的深和狭窄空间中标记工作空间的顶部

和底部平面的边缘而生成,并在机器人系统中实施了力觉和视觉反馈,结果表明集成了力觉和视觉反馈的虚拟夹具能有效避免碰撞。LI 等^[9]提出了遥操作医疗机器人虚拟夹具生成方法,采用加权、线性化、多目标优化框架形成初始任务的虚拟夹具库,利用手术缝合操作对此方法进行验证,结果表明手术缝合操作可在未预先多次试验的情况下进行,有利于避免对组织的损伤。杜广龙等^[10]对现有虚拟夹具结构不灵活、几何模型拼接不光滑和预警功能不足的问题,提出了一种基于有限元的自适应动态安全管道生成算法,给出了安全扩展管道的动态扩展算法和预警管道的动态生成算法,并通过实例验证算法,结果表明所设计的安全扩展管道可根据机器人的扩展需要进行动态避障扩张,并在机器人越出安全扩展管道时发出警报。田志宇等^[11]对复杂空间环境下遥操作的安全性问题,提出一种基于路径点的光滑虚拟管道快速生成算法,改进深度优先算法对虚拟管道进行静态规划,并给出动态修正算法,实现管道的动、静态避障。虚拟管道可为操作者提供视觉、触觉等反馈信息以调整自身操作。NICOLIS 等^[12]提出一种基于层次约束优化技术的双边遥操作控制器,利用运动约束来定义虚拟夹具和触觉渲染。该方法允许描述刚性和柔性虚拟夹具,此外,可以从优化算法的双重解决方案直接评估由于每个主动约束引起的运动反馈,消除基于惩罚的方法的典型约束渗透,并且特别适用于远程高精度操作。蒋再男等^[13]以空间机器人为例,在虚拟夹具辅助下,遥操作者通过空间鼠标和遥操作手套控制远端机械臂排除卫星故障。熊璟等^[14]将虚拟夹具引入机器人辅助腹腔手术治疗模型中,并研究了引导型和障碍型两类虚拟夹具的空间运动约束生成方法。SELVAGGIO 等^[15]提出一种基于在线生成虚拟夹具和任务切换的双边遥操作人机交互系统,用于提高双边遥操作系统的执行效率和减轻操作者操作负担,主要不足是需要利用内窥镜系统为机器人提供手术操作环境的准确信息。FERRAGUTI 等^[16]提出一种在包含多个主操作端和从操作端的遥操作系统上生成虚拟夹具的方法,用于引导操作者沿着无碰撞预定轨迹运动,并且这种方法已经在双臂手术机器人进行了测试。BU 等^[17]提出一种基于操作意图识别的双边遥操作虚拟夹具的在线生成方法,通过状态分析识别操作意图,并通过与虚拟环境集成的遥操作机器人系统进行验证。HONG 等^[18]将虚拟夹具用在计算机辅助外科训练的触觉引导系统中,针对触觉引导系统提出了一种简单而强大的带有禁区虚拟夹具的模糊逻辑控制器,用于辅助基于仿真的

腹腔镜手术训练。CHEN 等^[19]提出了一个简单而通用的阻抗虚拟夹具框架, 用于远程操作机器人手术系统中的主操纵器, 并进行了新手操作者控制主操纵器进行穿针和打结任务试验, 试验表明使用虚拟夹具的操作者穿针和打结任务准确率提高。

虚拟夹具是一种对主操作端进行约束的抽象传感数据, 它的主操作端的工作空间中生成, 对主操作端进行位置或力的约束控制。目前, 虚拟夹具在手术机器人人机协同领域的研究主要依靠于二维/三维成像设备得到的模型, 而医学成像设备成本较高, 术前准备时间较长, 因此虚拟夹具的应用受到限制^[2]。

目前用于路径规划的算法主要有神经网络算法、人工势力场算法和遗传算法等。神经网络算法是一个模拟生物神经系统的信息处理方法, 具有很高的自我学习和适应能力, 但需要事先提供大量的数据样本。遗传算法是一种通过模拟自然选择进化的随机搜索算法, 具有较好的搜索能力和避障效果^[20]。机器人辅助骨折复位手术中, 神经网络算法、人工势力场算法和遗传算法都可提供最优的规划路径和较好的避障效果, 但是神经网络算法不能解释推理过程和推理依据, 因此不能确保骨折复位手术安全。遗传算法需要初始化一些种群, 并且会出现未知种群, 计算复杂度较大, 难以确定遗传操作因子, 应用于机器人辅助骨折复位手术时, 手术操作的安全性较差。人工势力场法是由 KHATIB^[20]提出的一种虚拟力法, 不仅可以提供精确的避障效果还可以在机器人辅助骨折复位手术中给机器人末端提供虚拟力约束, 可结合骨折复位特点在骨折复位时添加引力和斥力, 提高复位手术安全性。LUO 等^[21]通过在人工势力场法中增加附加力的方法解决混合障碍环境下无人机轨迹规划问题。YU 等^[22]为克服传统人工势场法在移动机器人路径规划中的不足, 提出了一种改进方法, 即利用势场强度代替力矢量来规划移动机器人的路径, 试验表明该方法可以实现动态环境下移动机器人更好的路径规划。SONG 等^[23-24]针对传统的人工势场法存在局部最小的问题, 不能满足动态环境下的移动机器人实时路径规划, 安全性和可达性要求通过利用速度矢量, 修改势场力函数并结合模糊控制方法, 实时调整排斥势场的影响因素, 以克服人工势场法的不足, 仿真试验验证该方法的性能优于传统的人工势力场法。人工势力场法多用于机器人路径规划问题, 尚未见应用到机器人辅助骨折复位手术中。

本文为提高机器人辅助骨折复位手术操作的安全性, 提出一种基于复位路径包络误差的安全策略。

基于 CT 扫描数据进行断骨逆向建模, 采用 A* 算法规划避障复位路径。基于临床复位手术精度, 在复位机器人工作空间, 基于复位路径设定包络误差, 对复位路径进行约束限定, 根据临床手术精度要求建立包络误差圆模型, 由无数个包络误差圆形成误差包络圆柱体, 将包络圆柱体表面作为包络误差面, 并通过改进的人工势力场法在包络误差面与复位机器人末端建立斥力场, 引导复位机器人末端工具沿所规划的复位路径运动; 通过在骨折远端与近端之间建立引力场的方法来引导复位机器人进行骨折复位操作, 提高骨折复位精准度。最后, 开展仿真分析以验证所提出基于包络误差和改进人工势力场法的有效性。结果表明, 复位路径无障碍、有障碍情况, 采用有包络误差的安全策略时, 复位路径完全落在包络误差所限定的范围内, 复位路径与规划路径非常接近, 有效减小两者间的偏差。

1 机器人复位路径

医生操控复位机器人进行复位手术过程中, 并联机器人的动平台固定有夹持工具, 牢固夹持断骨远端并沿着所规划的复位路径, 通过基于图像配准的导航技术与断骨近端进行精准复位。由于患者骨折断面的位姿可能会发生变化, 需要事先规划并实时调整复位机器人的复位路径, 复位和定位机器人系统如图 1 所示。

图 1 复位和定位机器人系统

1.1 长骨骨折分型

复位机器人辅助骨折复位的长骨骨折分型标准不同于传统的 AO 长骨骨折分型。机器人辅助骨折复位的骨折分型标准是针对机器人辅助骨折复位容易实现的骨折类型制定的, 如粉碎性骨折, 传统骨折复位实现起来比较困难, 但机器人辅助复位实现较容易。反之, 对于传统简单骨折, 骨折尖端重叠度较大, 通过机器人骨折复位实现难度较大。长骨骨折分型标准除了表征一般意义上骨折严重程度, 还对复位机器人辅助骨折路径规划具有指导作用。

长骨骨折分型示意, 如图 2 所示, 骨折类型分为 A 型、B 型和 C 型骨折, A 型为粉碎性骨折, 复位后骨折近端与远端无重叠, B 型骨折复位后骨折

尖端重叠距离小于 8 mm, C 型骨折为复位后骨折尖端重叠距离大于 8 mm, 而 C 型骨折根据骨折断面相对位置分为 C_1 型骨折和 C_2 型骨折, A 型骨折和 B 型骨折的复位相对容易, C_2 型骨折的复位难度较大^[2]。本文以 C_2 型骨折为例, 进行骨折复位的安全策略研究。

图2 长骨骨折分型

基于逆向建模技术的股骨断骨模型重建, 首先将骨折 CT 扫描数据导入医学影像处理软件 Mimics, 应用图像分割算法对骨折的医学图像进行处理, 建立断骨部位的点云模型。其次, 将点云模型导入逆向工程软件 Geomagic studio 中, 完成曲面拟合, 然后构造桥接曲线将生成的曲面逐一缝合, 形成实体模型, 如图 3 所示。

图3 断骨逆向建模

1.2 基于特征点的骨折远端的姿态调整

三点可确定一个平面, 当平面的位姿确定时, 实体的位姿也就确定了。本文以骨折远端为例, 根据配准后的模型选取 6 个点, 分别为 A_1 、 B_1 、 C_1 和 A_2 、 B_2 、 C_2 , 以 A_1 、 B_1 、 C_1 为顶点确定股骨远端断裂线上的平面。设各点坐标为 $A_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B_1(x_2, y_2, z_2)$ 、 $C_1(x_3, y_3, z_3)$, 由光电导航仪的探针测量, 是相对光电导航仪的基准坐标系中的坐标。

图4 远端和近端基坐标系

1.3 骨折复位路径

复位路径规划时, 应尽量避免骨折远端沿轴向大幅度牵拉断骨。骨折远端沿垂直于轴向平移或沿轴向旋转时, 肌肉对复位机器人作用力最小, 断骨在这两个方向的运动比较安全。

在机器人操作空间, 采用 A* 搜索算法规划机器人操作的最短复位路径。由于 A* 算法是一种静态路网中求解最短路最有效的直接搜索方法, 其求解的是平面上从一点运动到另一点的最短路径, 因此需要将远端姿态和近端姿态进行调整, 然后再进行复位路径规划。

复位手术时, 首先基于健侧骨骼模型, 调整骨折远端的姿态, 使其达到合适的解剖位置。然后, 骨折近端固定不动, 复位机器人末端与骨折远端固定, 机器人按照规划的复位路径, 将骨折远端相对于近端做平移运动。复位移动中应避免骨折远端与周边的骨组织、近端等发生接触碰撞。

图 3 所示断骨模型的平面投影图, 如图 5 所示, 图中虚线部分为复位过程中的骨折远端所在位置, 即骨折远端和近端碰撞的临界状态示意图。骨折远端的复位起点为 O_1 点, 终点为 O_2 点, 骨折复位将骨折近端固定不动, 由复位机器人操作骨折远端, 从起点 O_1 沿规划的路径移动到终点 O_2 , 同时避免复位过程中与骨组织发生接触碰撞。进行复位路径规划时需根据临床情况设定障碍物, 因此设置 O'_1 所在直线及其左侧部分均为障碍物, 所规划的复位路径即 O_1 点的轨迹不能越过图中点划线及其左侧部分。

图5 远端和近端碰撞临界状态

以图 3 所示骨折为例, 采用 A* 搜索算法在 xoy 平面规划复位路径, 如图 6 所示, 符号 “@” 所表示的点为避障复位路径, 符号 “x” 表示障碍物所处位置。

图 6 规划的复位路径

2 复位机器人安全策略分析

对于骨折复位精度，临床上一般要求偏移量不超过 5 mm^[3]，因此，为确保骨折复位精度，实际机器人移动的路径与规划路径的偏差应限制在一定范围内。本文采用包络误差描述复位操作路径误差，建立包络误差模型，根据模型提出骨折复位手术路径安全策略。

2.1 包络误差

(1) 包络误差模型建立。外包络误差：在复位路径上任意点 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的横截面内，复位机器人末端偏离目标点最大允许距离 $R_2(S_i)$ ，以外包络误差 $R_2(S_i)$ 为半径形成外包络误差圆。

外包络面：由复位路径上的所有位置点对应的外包络误差圆，光滑连接后形成的圆柱体的外表面为外包络面。

任意点 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的包络误差圆可用一系列离散的点来描述^[11]，因此任意点 S_i 的包络误差模型可表示为

$$\Phi_i = \left(S_i, R \cos\left(\frac{2\pi k}{m}\right), R \sin\left(\frac{2\pi k}{m}\right) \right) \quad k=0, 1, \dots, m$$

式中， k, m 为自然数。

图 7 离散点坐标系

基坐标系中任意点 S_i 包络误差圆位于以 x 轴和 y 轴形成的平面内，包络误差模型中离散点圆心为 S_i ， z 轴为点 S_i 的切线的单位矢量 e_{z_i} ，坐标轴 $y = e_{z_i} \times \frac{OS_i}{|OS_i|}$ ，坐标轴 $x = z \times y$ ，因此位于基坐标系中的包络误差模型离散点的坐标可以确定。

(2) 包络误差面数学模型建立。包络面是由复位路径上点的包络误差圆衔接形成的光滑圆柱体的外表面，临床上医生用主操作手操控复位机器人沿着复位路径进行骨折复位时，机器人末端须限定在外包络面内，机器人在包络面内时，其运动方向不受限制，医生操作仅受到力的约束，假设复位路径是由点 $S_1, S_2, S_3 \dots S_i \dots S_n$ 形成的关于 $S(t)$ 光滑曲线，对应的外包络误差为 $R_2(S_1), R_2(S_2), R_2(S_3) \dots R_2(S_i) \dots R_2(S_n)$ 。

假设复位路径点 S_i 与 S_{i+1} 间距与 $R_2(S_i)$ 的比值趋于 0，即 $\frac{|S_i S_{i+1}|}{R_2(S_i)}$ 趋于 0，并且任意点 S_i 的包络误差模型中 m 趋于无穷大，那么复位路径上的包络误差点近似形成包络误差面。

2.2 复位路径的安全策略

复位机器人进行骨折复位手术时，机器人或者医生仅能独立完成部分手术操作，如果医生与机器人并不能协同作业，手术时机器人不能规避突然出现的障碍物，那复位手术则因缺乏灵活性导致手术操作安全性降低。如果人机能协同交互，医生通过操作主操作手远程操控复位机器人进行手术时，医生既可以按照术前规划的路径完成复位手术，也可以适当地调整机器人当前运动速度和位姿，规避突发性障碍物。

为了提高骨折复位精度和手术安全，采用基于包络误差的手术安全策略，在骨折复位路径上建立包络误差面，通过包络误差面约束机器人末端，使机器人末端与规划的复位路径的偏差在误差范围内，从而提高骨折复位精准度。

复位机器人末端与骨折远端刚性连接，机器人末端沿着复位路径逐渐接近骨折近端时，为了避免远端与周围的肌肉和软组织发生碰撞，其沿着复位路径允许的包络误差应逐渐减小。假设复位路径长度为 ρ ，骨折远端断面最大曲率半径和最小曲率半径分别为 ξ_1 和 ξ_2 ，骨折断面与纵轴线夹角为 ϕ ， $\xi_0 = (\xi_1 + \xi_2) \cos \phi$ ， $\rho > 4a\xi_0$ (a 为用于调节包络误差的阈值)，复位路径上与末端点 S_n 距离为 $4a\xi_0$ 的点为 $S_{4a\xi_0}$ ，点 $S_{4a\xi_0}$ 处的外包络误差半径为 $2a\xi_0$ ，则复位路径任意点 S_i 处的外包络误差半径 $R_2(S_i)$ 为

$$R_2(S_i) = \begin{cases} 2a\xi_0 & |S_1S_i| < L \\ 2a\xi_0 - \frac{|S_1S_i| - (|S_1S_n| - 4a\xi_0)}{2.5a\xi_0} a\xi_0 & |S_1S_i| > L \end{cases} \quad (1)$$

式中, $L = |S_1S_n| - 4a\xi_0$ 。

当机器人沿着复位路径的前 $\frac{|S_1S_n| - 4a\xi_0}{|S_1S_n|}$ 部分移动时, 其外包络面内部区域为圆柱体; 当机器人沿着复位路径的后 $\frac{4a\xi_0}{|S_1S_n|}$ 部分运行时, 其外包络面内部区域为圆台。

3 基于人工势力场的安全策略

人工势力场法是通过以机器人末端位置为参数的势力场函数计算人工势力场对机器人末端的虚拟力, 通过虚拟力来约束机器人末端的运动, 达到对机器人运动方向控制的目的。本文利用人工势力场法在误差包络面与机器人末端之间建立人工斥力场对位于包络误差空间中复位机器人进行力约束控制, 并在骨折近端与机器人末端之间建立人工引力场, 辅助医生进行骨折复位。

(1) 误差包络面与复位机器人末端之间的人工势力场模型建立。KHATIB^[20]提出的 FIRAS 函数建立人工斥力场, 斥力场定义为

$$U_{rep}(S) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{D(S)} - \frac{1}{D_0}\right)^2 & D(S) \leq D_0 \\ 0 & D(S) \geq D_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, η 表示斥力尺寸因子, D_0 表示外包络误差面势力场作用距离, $D(S)$ 表示机器人末端到外包络误差面的距离。对式 (2) 中 D 求梯度可得机器人末端受到的约束力 ζ

$$\zeta = \begin{cases} \eta\left(\frac{1}{D(S)} - \frac{1}{D_0}\right)\frac{1}{D(S)^2}\frac{\partial D(S)}{\partial S} & D(S) \leq D_0 \\ 0 & D(S) \geq D_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\frac{\partial D(S)}{\partial S} = \left(\frac{\partial D}{\partial x}, \frac{\partial D}{\partial y}, \frac{\partial D}{\partial z}\right)$ 。

由于包络误差面沿复位路径分为两部分, 则对现有有人工势力场模型, 采用分段改进。

当 $|S_1S_i| < |S_1S_n| - 4a\xi_0$ 时, 人工斥力场模型为

$$U_{rep}(S) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{2a\xi_0 - R(S)} - \frac{1}{D_0}\right)^2 & R(S) \neq 0 \\ 0 & \lim_{x \rightarrow S} R(S) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $D_0 = 2a\xi_0$, $R(S)$ 表示机器人末端与复位路径的最短距离。

人工斥力场中机器人末端受到的约束力为

$$\zeta = \begin{cases} \eta\left(\frac{1}{2a\xi_0 - R(S)} - \frac{1}{D_0}\right)\frac{-1}{(2a\xi_0 - R(S))^2}\frac{\partial R(S)}{\partial S}R(S) \neq 0 \\ 0 & \lim_{x \rightarrow S} R(S) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\frac{\partial R(S)}{\partial S} = \left(\frac{\partial R}{\partial x}, \frac{\partial R}{\partial y}, \frac{\partial R}{\partial z}\right)$ 。

当 $|S_1S_i| > |S_1S_n| - 4a\xi_0$ 时, 斥力场模型为

$$U_{rep}(S) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{R_2(S) - R(S)} - \frac{1}{D_0}\right)^2 R(S) \neq 0 \\ 0 & \lim_{x \rightarrow S_i} R(S) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $D_0 = 2a\xi_0$, $R_2(S) = 2a\xi_0 - \frac{|S_1S_i| - (|S_1S_n| - 4a\xi_0)}{2.5a\xi_0} a\xi_0$ 。

人工斥力场中机器人末端受到的约束力为

$$\zeta = \begin{cases} \eta\left(\frac{1}{R_2(S) - R(S)} - \frac{1}{D_0}\right)\frac{-1}{(R_2(S) - R(S))^2}\frac{\partial R(S)}{\partial S}R(S) \neq 0 \\ 0 & \lim_{x \rightarrow S_i} R(S) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\frac{\partial R(S)}{\partial S} = \left(\frac{\partial R}{\partial x}, \frac{\partial R}{\partial y}, \frac{\partial R}{\partial z}\right)$, $D_0 = 2a\xi_0$, $R_2(S) =$

$2a\xi_0 - \frac{|S_1S_i| - (|S_1S_n| - 4a\xi_0)}{2.5a\xi_0} a\xi_0$, ζ 的方向是沿 $U_{rep}(S)$ 的负梯度方向。

当复位机器人末端与复位路径的偏差 $R(S) = 0$ 时, 复位机器人刚好沿着复位路径运动, 此时机器人所受的约束力 $\zeta = 0$; 当复位机器人末端与复位路径的偏差 $R(S) \neq 0$ 时, 偏差 $R(S)$ 越大, ζ 越大, 当 $R(S) \rightarrow R_2$ 时, $\zeta \rightarrow \infty$, 机器人沿复位路径法向运动受到约束。

(2) 机器人末端与骨折近端间的人工势力场模型。复位机器人末端与骨折远端刚性连接, 机器人末端与骨折远端的运动保持一致。在机器人末端与骨折近端间建立人工引力场, 引力场的作用域起点为复位路径的点 $S_{4a\xi_0}$, 终点为复位路径的终点, 当机器人末端运动到点 $S_{4a\xi_0}$ 误差平面上时, 复位机器人开始受到引力场作用, 直至运动到复位路径终点, 此时完成骨折复位, 如图 8 所示。

采用 KHATIB^[20]提出的 FIRAS 函数建立人工引力场, 引力场函数描述为

$$U_{ou}(S) = \frac{1}{2} k_{ou} (O_i - O_g)^2 \quad (8)$$

式中, O_i 为机器人当前位置, O_g 为机器人目标点位置, k_{ou} 是尺度因子, 对式(8)求梯度可得机器人末端所受到的引力 F_{ou}

$$F_{ou} = k_{ou} (O_g - O_i) \quad (9)$$

式中, F_{ou} 沿 $U_{ou}(S)$ 的负梯度方向。

图 8 机器人复位示意图

对式(9)改进得复位机器人末端所受引力为

$$F_{op} = k_{ou} (O_g - O_i) \lambda \quad (10)$$

式中, $\lambda = \frac{(1 - \text{sgn}(|S_1 S_{4a\xi_0}| - |S_1 S_i|))}{2^{|\text{sgn}(|S_1 S_{4a\xi_0}| - |S_1 S_i|)|}}$, $|S_1 S_{4a\xi_0}|$ 为机

器人起点 S_1 至点 $S_{4a\xi_0}$ 的距离, $|S_1 S_i|$ 为复位路径上距离机器人当前位置 O_i 的最近点 S_i 至起点 S_1 的距离, O_g 与 S_n 重合。

当 $|S_1 S_i| < |S_1 S_{4a\xi_0}|$ 时, 机器人在复位路径 $S_1 S_{4a\xi_0}$ 之间的区域运动, 此时 $\lambda = 0$, 因此 $F_{ou} = 0$, 机器人不受引力场作用; 当 $|S_1 S_i| > |S_1 S_{4a\xi_0}|$ 时, 机器人在复位路径 $S_{4a\xi_0} S_n$ 之间的区域运动, 此时 $F_{op} = k_{ou} (O_g - O_i)$, 当机器人运动至目标点 O_g , $F_{op} = 0$, 完成骨折复位。

4 仿真验证

为验证基于包络误差和人工势力场法的复位机器人路径跟踪安全策略的可行性, 采用 Matlab 进行仿真验证, 所用数据均以骨折远端起始位置为坐标原点。第 1 组未实施基于复位路径包络误差的安全策略, 第 2 组实施基于复位路径包络误差的安全策略, 对比机器人末端实际路径与规划路径间的偏差。

4.1 未实施包络误差的安全策略

第 1 组, 根据路径规划所得的 36 个骨折复位路径点, 随机生成手动操作的实际路径, 如图 9 所示。

规划路径与实际路径在 OXY , OYZ , OXZ 三个坐标平面的投影, 如图 10 所示, 在 Y 方向实际路径偏离规划路径最高点 M_1 坐标为 (17.650 0, 6.582 0),

实际路径与规划路径在 Y 方向最大偏差为 3.662 0 mm。实际路径与规划路径在 X 方向最大偏离点坐标分别为 $N_2(9.659 0, 22.630 0)$, 因此在 X 方向最大偏差为 2.729 0 mm, 在 Y 方向最大偏离点坐标为 $N_6(14.620 0, 39.290 0)$, 在 Z 方向最大偏差为 $(Z_{N5} - Z_{N6})$, 此时沿规划路径的法向方向最大偏差为 $(Z_{N5} - Z_{N6}) \times \cos(45^\circ) = 2.285$ mm, 取 X 方向最大

图 9 实际路径与规划路径

(a) OXY 平面规划路径与实际路径

(b) OYZ 平面规划路径与实际路径

图 10 规划路径与实际路径在各坐标平面的投影

偏差, Y 方向最大偏差以及由 Z 方向求得的径向方向最大偏差的最大值作为实际路径与规划路径的最大偏差, 则实际路径与规划路径最大偏差为 3.662 mm。

4.2 实施包络误差的安全策略

第二组仿真试验中, 在规划路径周围添加包络误差, 形成包络面。在三维空间里的路径规划结果为 5 段直线的组合, 分别为 Q_1Q_2 , Q_2Q_3 , Q_3Q_4 , Q_4Q_5 , Q_5Q_6 , 如图 11 所示。根据实测骨折模型断面最大曲率半径与最小曲率半径之和 $(\xi_1 + \xi_2)$, 计算出在骨折横截面的投影 ξ_0 为 23 mm。图 3 所示的骨折模型的远端与近端空间距离为 2.5 mm 时, 骨折远端位于路径点 $S_{4a\xi_0}$ 骨折远端与骨折近端即将完成复位, 此时, 骨折远端逐渐与近端接近, 复位路径周围的包络误差面将随着骨折远端与近端间的距离减小而减小, 以确保机器人实现精准的复位作业。由骨折远端所在点 $S_{4a\xi_0}$ 与骨折近端距离 $4a\xi_0 = 2.5$ mm, 则外包络误差 $2a\xi_0 = 1.25$ mm, 即复位路径的最大外包络误差 $D_0 = 1.25$ mm, 此时用于调节包络误差的阈值 $a = 5/184$ 。

图 11 规划路径

如图 11 所示, 设定规划路径 Q_1Q_2 , Q_2Q_3 , Q_3Q_4 , Q_4Q_5 的外包络误差 R_2 为 1.25 mm。对于规划路径 Q_5Q_6 , 当其路径点与近端距离大于 2.5 mm 时, 外包络误差为 1.25 mm, 当其路径点与近端距离小于 2.5 mm 时, $R_2 = 1.25 - \frac{|S_i S_i| - (|S_i S_n| - 2.5)}{2.5}$ 。

根据术前规划的复位路径进行骨折复位操作时, 骨头被肌肉、软组织及血管包裹, 骨折远端的肌肉、软组织等相对于近端发生移位, 由于骨折周围肌肉力的牵拉作用, 复位过程中可能出现一些突发情况。考虑实际手术环境, 手术操作应实时避开突发性障碍物, 且不超过允许误差范围。设定复位路径上无障碍、有障碍物两种情况, 分别仿真分析。

(1) 复位路径上无障碍情况。假设临床上进行骨折复位过程中未出现突发情形, 复位路径上无突现的障碍物(如碎骨、软组织等)。医生手动操纵主操作手控制并联机器人进行骨折复位时, 根据图像引导沿着规划路径运行, 因此利用 Matlab 仿真时, 为确保仿真效果与临床试验相接近, 在规划路径拐点 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 和目标点 Q_6 处设置临时引力点, 模拟医生控制机器人末端沿规划路径运行。仿真试验中, 当机器人末端运动至 Q_2 之前, 以 Q_2 作为引力点, 当到达 Q_2 后, 以 Q_3 作为引力点, 同理依次类推至 Q_5 , 到达 Q_5 后, 以目标点 Q_6 作为引力点。同时, 在以规划路径的路径点为圆心, R_2 为半径的圆上均匀取 101 个点近似模拟每个路径点的包络误差圆, 包络误差圆的近似点斥力作用半径趋近于 R_2 。

仿真结果, 如图 12 所示, 在三维坐标系中复位路径与规划路径几乎重合, 表明机器人末端以较小的误差沿着规划路径到达目标点。

图 12 规划路径与实际路径

仿真复位路径与规划路径在 OXY 平面, OYZ 平面和 OXZ 平面的投影, 如图 13 所示。当位于路径 Q_5Q_6 的骨折远端与骨折近端距离小于 2.5 mm

时, 仿真路径与规划路径的偏差为 0。当位于路径 Q_3Q_6 上的骨折远端与骨折近端距离大于 2.5 mm 或位于路径 Q_1Q_2 , Q_2Q_3 , Q_3Q_4 , Q_4Q_5 时, 仿真复位路径与规划路径最大偏差点坐标为(4.055 0, 3.259 0, 0.925 0), 规划路径与最大偏差点的距离最近点坐标为(4.055 0, 2.920 0, 0), 此时最大偏差为 0.985 2 mm, 圆柱状包络误差面的包络误差 $R_2=1.25$ mm, 仿真路径在包络误差面内。

图 13 规划路径与实际路径在二维平面投影

(2) 复位路径上有若干障碍情况。基于上述无障碍的理想情况, 在所规划的复位路径上设置 8 个障碍点, 这些点在复位终点坐标系中的坐标分别为(0.577 5, 2.920 0, 0), (1.732 5, 2.920 0, 0), (6.930 0, 2.920 0, 9.240 0), (6.930 0, 2.920 0, 23.100 0), (6.930 0, 2.920 0, 32.340 0), (16.170 0, 2.920 0, 43.890 0), (25.410 0, 2.920 0, 53.130 0), (34.650 0, 2.920 0, 62.370 0)。仿真结果如图 14 和图 15 所示。

图 15 规划路径与实际路径在二维平面投影

图 14 为机器人沿着所规划的路径避开障碍物从起点到达目标点,完成骨折复位。图 15 为规划路径与实际复位路径在 OXY , OYZ 和 OXZ 三个坐标平面的投影。可看出,当位于路径 Q_5Q_6 的骨折远端与骨折近端距离小于 2.5 mm 时,实际轨迹上与规划轨迹最大偏差为 0 ,此时圆台状包络面最小包络误差为 $R_{2\min}=0.25\text{ mm}$ 。当位于路径 Q_5Q_6 的骨折远端与骨折近端距离大于 2.5 mm 或位于路径 Q_1Q_2 , Q_2Q_3 , Q_3Q_4 , Q_4Q_5 时,仿真路径与规划路径最大偏差点坐标为 $(4.053\ 0, 3.259\ 0, 0.903\ 9)$,规划路径与最大偏差点的距离最近点坐标 $(4.053\ 0, 2.920\ 0, 0)$,因此最大偏差距离为 $1.009\ 0\text{ mm}$,圆柱状包络误差面的包络误差 $R_2=1.25\text{ mm}$,因此,在圆柱状包络误差面内,骨折远端在避开障碍物的同时未超出圆柱状包络误差面。

对比无障碍与有障碍两种情况的复位路径仿真,无障碍时仿真复位路径的最大偏差为 $0.985\ 2\text{ mm}$,有障碍时仿真复位路径最大偏差为 $1.009\ 0\text{ mm}$,最大偏差均未超过包络误差。

5 结论

为提高机器人辅助骨折复位手术操作精准性和安全性,本文提出一种基于复位路径包络误差的安全策略。首先沿规划的复位路径建立误差包络面,采用人工势力场法在误差包络面和复位机器人末端建立斥力场来引导机器人沿着复位路径运动,并通过在机器人末端和骨折近端之间建立引力场辅助医生完成骨折远端与近端的复位。仿真结果可知,未实施基于包络误差安全策略的仿真复位路径与规划路径最大偏差大于添加包络误差的仿真复位路径与规划路径的最大偏差;实施基于包络误差安全策略后,无障碍情况下,实际路径与规划路径基本重合。

临床上进行骨折复位时,由于复位机器人要克服肌肉力的作用先对骨折远端进行牵引拉伸,然后再沿复位路径进行复位操作,在对骨折远端牵引时可能会使断骨周围肌肉和软组织的位置发生改变,甚至可能突现在术前规划的路径上,因此机器人需要能够避开障碍物,且不影响骨折复位精度,考虑临床情况的仿真结果表明,利用基于包络误差的安全策略生成的复位路径能较好地避开障碍物,路径偏差未超过包络误差,术前可根据临床要求设定用于调节包络误差的阈值,确定合适包络误差值,提高骨折复位精度。本文基于复位路径包络误差和改进人工势力场的骨折复位安全策略,能够提高复位机器人的操作精准度和安全性。

本文从复位路径角度,提出基于复位路径包络误差和改进人工势力场的安全策略,对复位机器人的复位路径进行位置约束,尚未对复位机器人进行力约束。为进一步提高复位机器人手术安全性,推进机器人临床应用,需要结合临床手术操控,进行骨折复位力控制,对机器人末端与骨肌组织间的复位力进行精准检测,建立接触碰撞模型,并控制骨折复位机器人施加在骨折远端的力,避免对骨折周围肌肉软组织等造成二次伤害。后续将基于复位路径的包络误差安全策略,进行骨折复位机器人的力检测与实时控制,提高骨折复位精准度和安全。

参 考 文 献

- [1] 雷静桃,曹元龙,胡磊,等. 机器人辅助膝关节置换手术系统研究综述[J]. 机械设计, 2014(1): 1-8.
LEI Jingtao, CAO Yuanlong, HU Lei, et al. Review of research on robotic assisted knee replacement surgery system[J]. Mechanical Design, 2014(1): 1-8.
- [2] 李长胜. 遥操作骨折复位机器人系统关键技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015.
LI Changsheng. Research on key technologies of teleoperation fracture reduction robot system[D]. Beijing: Beihang University, 2015.
- [3] 赵燕鹏. 长骨骨折精准手术机器人系统研究[D]. 北京: 中国人民解放军医学院, 2016.
ZHAO Yanpeng. Research on precise surgical robot system for long bone fracture[D]. Beijing: Medical School of Chinese PLA, 2016.
- [4] ROSENBERG L B. Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation[C]// IEEE Virtual Reality International Symposium. Computer Society, 1993: 76-82.
- [5] MARAYONG P, HAGER G D, OKAMURA A M. Control methods for guidance virtual fixtures in compliant human-machine interfaces[C]// IEEE/RSJ International

- Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2008: 1166-1172.
- [6] KRAGIC D, MARAYONG P. Human-machine collaborative systems for microsurgical applications[J]. International Journal of Robotics Research, 2005, 24(9): 731-741.
- [7] PARK S, HOWE R D, TORCHIANA D F. Medical image computing and computer-assisted intervention[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2001.
- [8] NAKAZAWA A, NANRI K, HARADA K, et al. Feedback methods for collision avoidance using virtual fixtures for robotic neurosurgery in deep and narrow spaces[C]// IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics. 2016: 247-252.
- [9] LI Ming, KAPOOR A, TAYLOR R H. Telerobotic control by virtual fixtures for surgical applications[J]. Advances in Telerobotics, 2016, 31: 381-401.
- [10] 杜广龙, 张平. 具预警功能机器人遥操作动态虚拟夹具的设计[J]. 华南理工大学学报, 2012, 40(4): 43-48.
DU Guanglong, ZHANG Ping. Design of remote virtual dynamic fixture for robot with early warning function[J]. Journal of South China University of Technology, 2012, 40(4): 43-48.
- [11] 田志宇, 黄攀峰, 刘正雄. 辅助空间遥操作的虚拟管道设计与实现[J]. 宇航学报, 2014, 35(7): 834-842.
TIAN Zhiyu, HUANG Panfeng, LIU Zhengxiong. Design and implementation of virtual pipeline for auxiliary space teleoperation[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(7): 834-842.
- [12] NICOLIS D, ZANCHETTIN A M, ROCCO P. A hierarchical optimization approach to robot teleoperation and virtual fixtures rendering[J]. 2017, 50(1): 5672-5679.
- [13] 蒋再男, 刘宏, 谢宗武, 等. 3D 图形预测仿真及虚拟夹具的大时延遥操作技术[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 78-81.
JIANG Zainan, LIU Hong, XIE Zongwu, et al. 3D graphics prediction simulation and large time delay teleoperation technology of virtual fixture[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(1): 78-81.
- [14] 熊璟, 陈恩, 夏泽洋. 机器人辅助腹腔介入治疗的空间运动约束及控制策略[J]. 机器人, 2009, 31(6): 612-619.
XIONG Jing, CHEN Ken, XIA Zeyang. Spatial motion constraint and control strategy of robot assisted abdominal interventional therapy[J]. Robot, 2009, 31(6): 612-619.
- [15] SELVAGGIO M, NOTOMISTA G, CHEN Fei, et al. Enhancing bilateral teleoperation using camera-based online virtual fixtures generation[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2016: 1483-1488.
- [16] FERRAGUTI F, PREDAN, BONFE M, et al. Bilateral teleoperation of a dual arms surgical robot with passive virtual fixtures generation[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2015: 4223-4228.
- [17] BU Wanghui, LIU Guangjun, LIU Chengju. Online generation of virtual fixture for bilateral teleoperation based on intention recognition[C]// International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics. 2016: 122-126.
- [18] HONG M, ROZENBLIT J W. A haptic guidance system for computer-assisted surgical training using virtual fixtures[C]// IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 2017: 2230-2235.
- [19] CHEN Zihan, MALPANI A, CHALASANI P, et al. Virtual fixture assistance for needle passing and knot tying[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2016: 2343-2350.
- [20] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [21] LUO Guanchen, YU Jianqiao, MEI Yuesong, et al. UAV path planning in mixed - obstacle environment via artificial potential field method improved by additional control force[J]. Asian Journal of Control, 2015, 17(5): 1600-1610.
- [22] YU Zhenzhong, YAN Jihong, ZHAO Jie, et al. Mobile robot path planning based on improved artificial potential field method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(1): 349-354.
- [23] SONG Qiang, LIU Lingxia. Mobile robot path planning based on dynamic fuzzy artificial potential field method[J]. Computer Engineering & Design, 2010, 9(17): 5233-5240.
- [24] 刘俊雅. 基于人工势力场法的移动机器人避障算法研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
LIU Junya. Research on obstacle avoidance algorithm based on artificial potential field for mobile robots[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2018.

作者简介: 雷静桃, 女, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能机器人技术。
E-mail: jtlei2000@163.com
王洋, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为智能机器人技术。
E-mail: 18817296582@163.com