

DOI: 10.3901/JME.2022.13.001

骨折复位及畸形矫正机器人的轨迹规划研究进展*

崔 睿^{1,2} 陈殿生³ 苏 鹏⁴ 李 剑^{5,6} 孙 昊^{1,2}

(1. 河北工业大学人工智能与数据科学学院 天津 300130;

2. 河北工业大学智能康复装置与检测技术教育部工程研究中心 天津 300130;

3. 北京航空航天大学机器人研究所 北京 100191;

4. 北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192;

5. 北京邮电大学自动化学院 北京 100876;

6. 国家康复辅具研究中心北京市老年功能障碍康复辅助技术重点实验室 北京 100176)

摘要: 骨折复位及畸形矫正机器人对于人体肢体功能的重建具有积极的意义,其轨迹规划的质量直接影响着术后的效果和机器人的实用性,然而目前系统的轨迹规划研究分析较少。简述了骨折复位及畸形矫正机器人国内外发展现状,分析了断骨复位、重建轨迹规划的关键技术和共性问题,从轨迹规划的发展历程、分类以及求解方法三个方面对骨折复位及畸形矫正机器人的轨迹规划研究进展和关键技术进行了综述,并就目前存在的问题和未来发展进行了总结分析,以期为骨折复位及畸形矫正机器人的轨迹规划提供参考和建议,具有积极的研究意义。

关键词: 骨折复位; 畸形矫正; 机器人; 轨迹规划; 肌骨模型一体化

中图分类号: TP24

Research Progress on Trajectory Planning of Fracture Reduction and Deformity Correction Robot

CUI Rui^{1,2} CHEN Diansheng³ SU Peng⁴ LI Jian^{5,6} SUN Hao^{1,2}

(1. School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2. Engineering Research Center of Intelligent Rehabilitation Device and Detection Technology of Ministry of Education, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

3. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191;

4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192)

5. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876;

6. Beijing Key Laboratory of Rehabilitation Technical Aids for Old-Age Disability, National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176)

Abstract: The fracture reduction and deformity correction robot has positive significance for the reconstruction of human limb function. The postoperative effect and the practicability of the robot are directly affected by the quality of its trajectory planning. However, there are still few systematic studies on trajectory planning analysis. The development status of fracture reduction and deformity correction robot at home and abroad is briefly described, and the key technologies and common problems of the trajectory

* 国家自然科学基金(52005120, 52005045)、北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金(19L2018)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(118009001000160001)资助项目。20210713 收到初稿, 20211121 收到修改稿

planning for reduction and reconstruction of broken bone are analyzed. The research progress and the key technology of trajectory planning for fracture reduction and deformity correction robot are reviewed from the development course, classification and solution methods. Meanwhile, the problems at this stage are summarized and analyzed, and the trend for future development is pointed out. The references and suggestions are expectantly provided for the trajectory planning of fracture reduction and deformity correction robot, which has positive research significance.

Key words: fracture reduction; deformity correction; robot; trajectory planning; integration of musculoskeletal model

0 前言

随着老龄化社会的深入,现代交通事故及自然灾害的多发,意外摔伤、事故等造成的骨折人数越来越多^[1]。据英国南安普敦大学研究预测 2040 年全世界骨折高风险人数将达到大约 3.19 亿,尤其是长骨骨折,约占全身骨折的 6%^[2-3]。同时,我国有残疾人 8 500 多万,其中肢体残疾患者接近 3 000 万,仅国家康复辅具研究中心附属康复医院矫形骨科团队,截至 2018 年 12 月就完成各类复杂肢体畸形矫正手术 35 057 多例。

机器人作为一种现代技术,具有节省人力,操作精准、效率高等特点,其在工业、医疗、航天等领域的应用,已愈加成熟。尤其是在医疗领域的应用,近几年发展迅速。骨折复位及畸形矫正机器人作为医疗机器人的一个分支,是集医学、传感器技术、人工智能、机械、控制以及生物力学等多学科交叉融合而成的应用方向^[4]。骨折复位及畸形矫正机器人的研究在过去几十年时间里已取得了一系列的成果^[5-7],如 WESTPHAL 等^[8]研制的基于导航技术的长骨骨折复位机器人系统,德国研制的 RepoRobo 骨折复位机器人^[9]和 Robotic Hexapod 外固定器,日本东京大学研制的 FRAC-ROBO 六自由度骨折复位机器人系统^[10],以及秦泗河等^[11]研制的用于胫骨和跟腱延长的 Ilizarov 环形固定架等。但是由于机器人的安全性、稳定性、准确度及易用性等方面的因素,目前很多骨折复位及畸形矫正机器人的研究仍然停留在临床试验阶段,距离真正的临床应用还存在一定的差距。尤其是在机器人的轨迹规划、控制方法、图像导航及建模等关键技术方面,还需要进一步的深入研究。

不同场景的机器人,其轨迹规划方法千差万别,但对于医疗机器人,其轨迹规划必须遵从人体解剖学及生物力学原理。对于骨折复位及畸形矫正机器人,断骨复位及畸形骨重建轨迹规划是机器人运动控制的基础,其直接决定着断骨复位及畸形骨重建

的效果。同时,区别于工业机器人,其规划的合理与否也体现着以人为本的医学治疗理念。从临床角度讲,骨折复位及畸形矫正机器人的治疗效果主要体现在两个方面:精度,保证复位或矫正结束后骨折断端之间形成解剖形态学上的复位及生理功能的重建^[12];安全性,减少复位过程中末端速度以及加速度的突变性和电机的抖动引起的机器损坏和对患者的意外伤害,实现机器人的消耗能量最优和对骨骼、肌肉等组织的破坏最小。骨折复位及复杂畸形矫正机器人的轨迹规划不仅直接影响着治疗的精度,而且也关系着使用的安全性。由此,深入研究骨折复位及复杂畸形矫正机器人的轨迹规划,解决机器人实际应用过程中骨折断端的碰撞以及人体肌肉的拉扯等问题^[13],对于推动医疗机器人应用和产业化,是十分必要,且极具实际意义的。然而,目前骨折复位及复杂畸形矫正机器人的轨迹规划多模仿传统的工业机器人,缺乏肌骨一体化的轨迹规划及标准,且尚缺乏系统性的文献综述分析,这对于骨折复位及复杂畸形矫正机器人的研究发展十分不利。

基于以上分析,本文从骨折复位及畸形矫正机器人的分类出发,对国内外骨折复位及畸形矫正机器人的发展进程进行了总结分析,提出了其轨迹规划的共性问题,进一步对轨迹规划方法、算法进行了分类和总结,并从规划空间、机器人分型以及算法求解三个角度出发综述了机器人轨迹求解的思路,总结分析了目前存在的问题和未来发展趋势,可以为骨折复位及畸形矫正机器人的轨迹规划提供参考和建议。

1 骨折复位及畸形矫正机器人

1.1 骨折复位机器人

骨折是意外导致的肢体伤害,可以通过手术和非手术进行治疗,非手术治疗主要是中医手法复位,手术治疗主要以切开复位和髓内钉内固定技术为主。骨折复位机器人是借助机器人技术结合临床方

法恢复骨折部位到正常解剖形态及生理功能的手术机器人。根据其结构,可以分为并联型、串联型以及混合型机器人^[14-15]。骨折复位机器人设计的最终目标是达到满意的治疗效果下解放医生的双手,其应用能够降低医生劳动强度,而且具有精度高、抗疲劳、可重复性好等优点,从而受到学者和医生的广泛关注。但是其与人体生物组织特性息息相关的特征也加大了研发难度,目前尚缺乏实用性的临床应用。

工业领域是人类应用机器人最早、最广泛的领域,如图 1 所示^[16],自从 1947 年第一台伺服电动遥控机械手的发明,人们开始了对机器人的研究。1996 年 BOUAZZA 将机器人技术应用到骨折复位手术当中,代表着机器人在骨折复位领域的应用开始。随着机器人的研究越来越深入,人们根据骨折复位治疗方法设计了各种各样结构类型的机器人,但是大多都是在工业机器人的基础上进行改进和设计,以此来辅助医生治疗骨科疾病。如德国、英国、日本等国家相继根据骨折治疗的特点和工业机器人结构的特点设计的骨折复位机器人,使得人们对于机器人的概念越来越丰富。从骨折复位机器人发展历程可以发现,德国最早开始骨折复位机器人的设计与研发。RepoRobo 和 Interlligent Fixator 是由德国设计出的最早的串联型结构和并联型结构骨折复位机器人。但是目前为止学者们研究的机器人都停留在样机阶段,仍然存在一定的使用风险。近期,有学者提出骨折复位机器人的发展趋势应该在机构的改进、图像导航等技术方面^[17]。

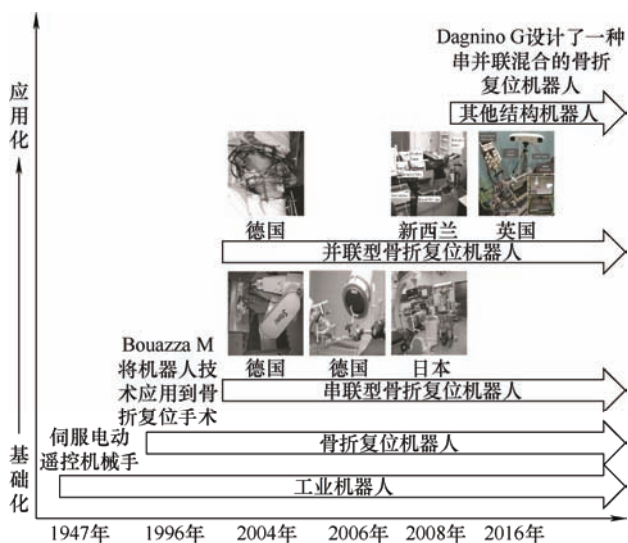


图 1 骨折复位机器人的研究进展

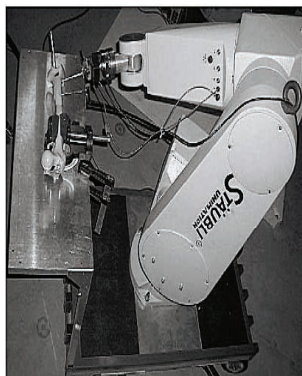


图 2 RepoRobo

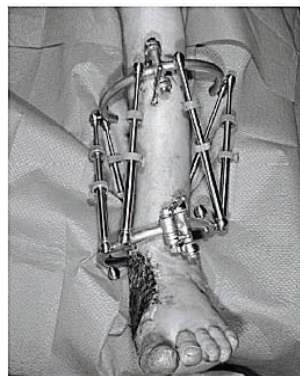


图 3 Interlligent Fixator

在国内,哈尔滨工业大学在 2008 年最早开始骨折复位机器人的研究,设计了以 Stewart 平台为基础的辅助医生进行复位的 6-SPT 可穿戴式骨折复位机器人,并在骨骼模型上进行了实验;中国人民解放军总医院的唐佩福等^[18]研究了 3D-CT 图像重建技术为基础的长骨骨折复位机器人系统,经过体外实验,取得了不错的效果;第四军医大学军事生物医学工程系史刚等^[19]在分析骨折治疗方法的基础上设计了一种具有六自由度的股骨干骨折复位机器人,并在动物上进行了骨折复位实验,取得了良好的效果,相关的临床实验仍处于审批中。一系列研究在我国开展起来。

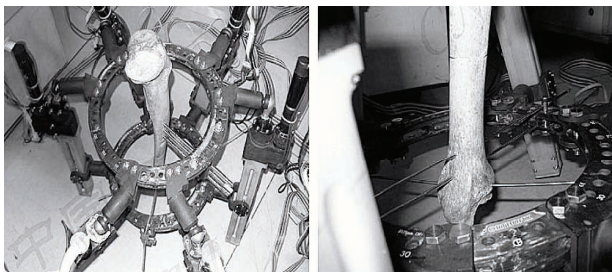


图 4 6-SPT 可穿戴式骨折复位机器人系统

综上所述,国内外学者在骨折复位机器人的结构设计上做出了大量的研究,并且在模型骨实验上取得了良好的效果,但是由于很多机器人未考虑人体软组织因素、人体生理组织的复杂性及规划轨迹的安全性,从而导致骨折复位机器人的安全性受到临床医生和患者质疑,目前多停留在试验阶段,机器人的安全性和精准度尚存在一定问题。

1.2 畸形矫正机器人

畸形矫正,尤其是复杂肢体畸形,是对先天或疾病引起的肢体畸形,通过手术的方式截断畸形部位,重新恢复正常形态及功能的过程。畸形矫正机器人是借助机器人技术重塑和恢复畸形部位到正常解剖形态及生理功能的医疗机器人。Ilizarov 环形固定架和泰勒空间的外固定架是临床应用最广的两种

畸形矫正机器人,其应用有效解决了传统手术将断骨暴露于医生视野下造成的骨骼环境破坏和二次损伤等问题。但是存在着固定环和驱动杆之间的非线性关系使得断骨的轨迹不可控,易发生偏离预定轨迹,造成额外损伤,及矫正过程中软组织和骨骼牵引速率不均等临床问题。

畸形矫正一直是骨科疾病治疗中的难题。第二次世界大战期间,前苏联人伊利扎洛夫于 1951 年报道了一种用外固定架延长肢体的方法,简称“Ilizarov”。1981 年,Ilizarov 被意大利引进,并随后被推广到欧美等各国,成为了目前矫正肢体短缩畸形的最佳骨延长方法。Ilizarov 外固定架通过调节固定环之间杆的长度实现畸形部位在空间中位姿的变化,能够在不进行大规模手术的情况下进行肢体的畸形矫正和功能重建。1994 年,TAYLOR 兄弟将 Stewart 平台和 Ilizarov 外固定架技术结合,设计出了具有泰勒空间的外固定架^[20],增加了外固定架的自由度,标志着无驱动机器人的骨折复位机器人的改进。其与并联结构骨折复位机器人十分类似,但一般多采用无源的形式,可以根据临床情况进行手动调整,具有良好的实用性^[21]。随后,德国开发了 Robotic Hexapod 外固定器,在驱动杆上安装电机实现了长度的精确调整,避免了人工操作产生的误差。



图 5 Robotic Hexapod 外固定器

在我国,直到 21 世纪外固定架技术才逐渐受到广大骨科医生的重视。但是在 20 世纪 80 年代,孟和等就研制出了称为“孟氏架”的骨外固定架;随后在 1992 年夏和桃等^[22]研制出了用于骨牵引延长及矫形的组合式外固定架,具有牵伸、加压的功能;2004 年之后在秦泗河等的推动下,骨外固定器在我国流行开来。各种具有新型结构的外固定器相继被设计。另外,ZUO 等^[23]设计了一种新型的并联型可调节外固定器 PDA-Uos,用于足踝部位的畸形矫正,同时对其工作空间进行了分析与仿真。骨外固定器的使用需要大量的数学计算,因此随着机器人技术

的发展,各种基于计算机视觉知识的矫正平台系统应运而生,如浙江工业大学^[24]搭建的骨外固定矫形支架系统以及河北工业大学^[25]搭建的基于 OpenGL 的泰勒骨外固定器仿真平台。

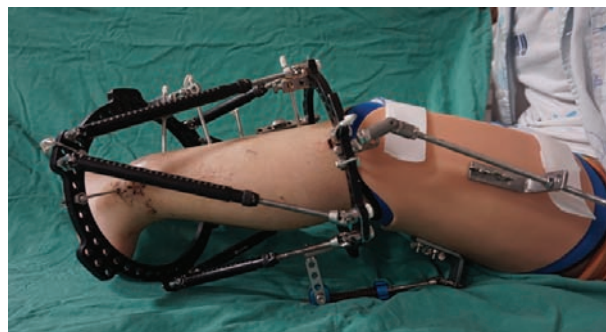


图 6 Taylor 外固定架

畸形矫正机器人技术的发展正处于上升阶段,虽然这种技术已经应用于临床,但是在参数测量、处方设计、矫正精度、智能化程度等方面仍然存在很多问题,没有实现自动化,具有很大的发展空间。

1.3 共性问题

骨折复位及畸形矫正机器人系统的设计是辅助医生或者自主完成断骨部位在形态学或者功能学上的复位和重塑。如表 1 所示,在实施的过程中,骨折复位机器人以及畸形矫正机器人都针对人体的软、硬组织进行新的重建或重塑。在骨折或者畸形部位矫正的过程中,均涉及骨骼硬组织及肌肉等软组织协同复位控制、轨迹优化等共性问题。由此,针对此共性问题,以机器人的轨迹规划为切入点,综述骨折复位及畸形矫正机器人的轨迹规划的发展历程,分类及求解思路,对于解决骨折复位及畸形矫正机器人的轨迹规划共性问题,提高手术精准度、安全性及临床实用化是极具意义的。

表 1 骨折复位机器人和畸形矫正机器人对比

内容	骨折复位机器人	畸形矫正机器人
治疗对象及特点	外力导致的骨骼不连续现象,伴随着肌腱等部位的损伤;通过手术完成骨折断端的复位及软组织的重建。	疾病或者先天导致的骨骼形态异常;通过手术截断畸形骨,利用骨自身生长的方式,逐步调整矫正畸形部位,重塑骨骼硬组织及相关软组织的解剖位和功能。
治疗效果	纠正形态和功能的异常骨骼和软组织,使患者恢复正常的解剖位和功能。	纠正轨迹不可控、处方设计不当导致矫正失败等。
目前存在的问题	机器人运动轨迹安全性低、复位准确度差等。	

2 轨迹规划发展历程及分类

轨迹是机器人运动部位在定义坐标系下位置和姿态关于时间的变化过程^[26]，涵盖了机器人运动速度和加速度的变化。轨迹规划是在速度、加速度等相关约束条件下，按照任务要求通过机器人结构的运动学正逆解对末端执行器轨迹进行规划的过程，对于机器人的应用安全性、精度等具有举足轻重的作用。

2.1 轨迹规划发展历程

如图 7 所示，直线、圆弧是最早被使用的规划曲线，由于其适用场景受限，因此更加平滑的样条曲线逐渐得到应用。上述解析法能够对实际问题进行明确的数学表达，一直是学者沿用的方法，却存在着效率不高等问题。近年来由于轨迹规划考虑因素的增多以及应用场景的进一步扩展，使得轨迹的解析式表达越来越困难。由此，运用智能算法计算轨迹的数值解得到相关学者的青睐和广泛应用。这对于骨折复位及畸形矫正机器人等医疗机器人的轨迹求解具有重要的借鉴意义。

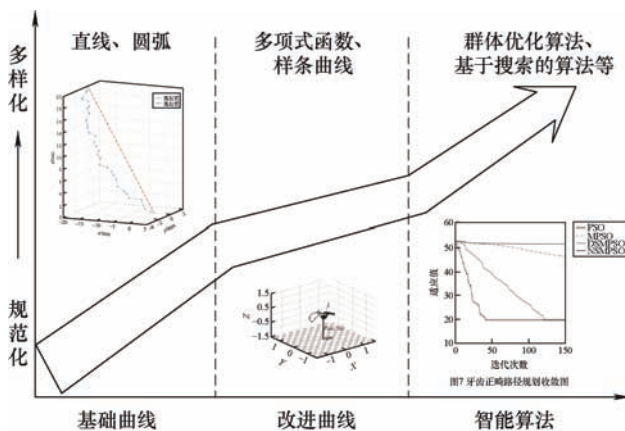


图7 轨迹规划曲线的研究进展

由于骨折复位及畸形矫正机器人的规划轨迹不统一，因此在解决此类问题上相关学者大多根据三维建模技术获取断骨部位的位姿，继而采用经典的轨迹进行规划。胡磊等^[27]结合另一侧的健康肢体利用迭代算法得到了骨折部位的位姿参数；GUSTAFSSON 等^[28]则利用有限元方法预测了单腿加载下的骨折路径，对于骨折治疗和预测具有重要的价值；朱庆^[29]利用五次多项式在关节空间进行了骨折复位机器人的轨迹规划，完成了机器人的牵引动作；桑圣楠等^[30]采用 B 样条曲线以及渐进式的策略对畸形矫正的轨迹进行规划，提高了矫正动作路

径的规划质量；KIM 等^[31]讨论了单侧固定器在结构限制及其关节的运动约束条件下，关节变量以小增量匀速变化的复位路径，并通过模拟验证其不存在碰撞等情况；LI 等^[32]利用 VTK 软件建立骨折部位的三维模型并提取路径节点位姿信息，然后利用逆运动学方法控制其运动到相应路径节点，实验结果表明位移误差在 2 mm 范围内，角度误差在 2.5° 范围内，但是其未对机器人的运动进行约束，实验只是证明了直线路径规划的有效性。但是以上方法不适用于动态的环境，存在着运动过程中躲避障碍物的问题。相对而言，基于智能算法的轨迹规划方法可以适应动态环境，在轨迹优化、求解速度及精度上具有明显优势，如群体优化算法、基于搜索的算法等。

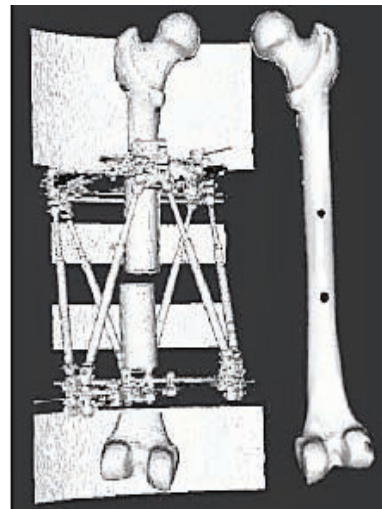


图8 迭代算法得到位姿参数

目前，粒子群算法、遗传算法等是应用最广泛的群体优化算法，在轨迹的规划及优化处理上具有极大的优势。群体优化算法是一种通过模拟生物行为的方式进行寻优的算法，具有较好的搜索能力，但是算法的性能需要得到提升。如改进的粒子群算法应用于牙齿矫正的路径规划^[33]，实现了规划过程的最优控制，改进的算法提高了其收敛速度；孙昊等^[34]采用遗传算法优化了畸形矫正路径，降低了治疗过程中的偏差问题。RRT、A*等基于搜索的算法在轨迹规划中也得到广泛应用，得益于其快速性、便利性以及搜索范围广的优点。该算法能够快速得到规划轨迹的数值解结果以及实现轨迹的最优控制，但是这种方法只能得到次优解而且代价过大，因此对算法的改进是未来的发展趋势之一。雷静桃等^[35]利用 A*算法规划复位路径并且引入了包络面以及人工势场法研究了复位路径的安全性策略，保

证了轨迹跟踪的安全性；石开铭^[36]针对柔性针穿刺的轨迹规划问题进行了研究，根据柔性针的运动学模型结合在 RRT 算法中嵌入多树搜索策略、目标导引策略、可达空间策略以及最优选择策略完成了柔性针介入皮肤实现避障(如血管、器官等)的功能。断骨复位及畸形重建的复杂环境，导致求解满足实际要求的轨迹解析解过于困难。同时，轨迹规划的环境是动态的，因此上述方法可适用于骨折复位及畸形矫正机器人轨迹规划问题的求解。但是目前断骨运动路径研究发展较为缓慢，且上述方法的实际应用极少，规划结果也无法满足临床上的要求。

2.2 轨迹规划分类

2.2.1 根据规划空间不同

由于骨折复位及畸形矫正机器人的结构多建立在工业机器人发展的基础上，因此根据规划空间的不同可以将其分为关节空间中的轨迹规划和笛卡儿空间中的轨迹规划。由哈尔滨工业大学^[37]主导的穿戴式辅助并联机器人系统在关节空间中通过运用 HIT6501 运动控制板实现了梯形速度轨迹运算器，运用机器人机构的正运动方法计算出关节的运动量实现了关节变量的插值，保证了机器人运动的连续性和平滑性；郭悦等^[38]验证了应用六自由度并联机器人模拟中医正骨手法的可行性，通过对末端执行器运动轨迹的规划实现了机器人的运动，并在模型骨上进行实验分析了六自由度机器人的复位误差；人工势场法^[39]被应用于康复训练机器人末端机械臂的康复轨迹规划，实现了从起始点到目标点的连续轨迹规划。

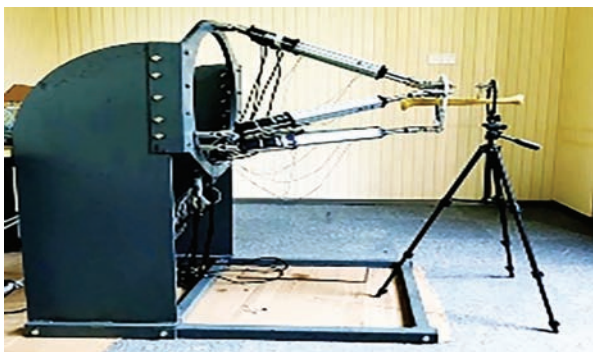


图 9 六自由度并联机器人

关节空间的轨迹规划方法和笛卡儿空间的轨迹规划方法各有优缺点。笛卡儿空间的轨迹规划能够直接反映末端工作点的位姿。关节空间的轨迹规划方法更加简单。因此，在对末端任务要求严格的情况下对笛卡儿空间进行轨迹规划，在末

端运动约束较少的情况下对机器人进行关节空间的规划较多。

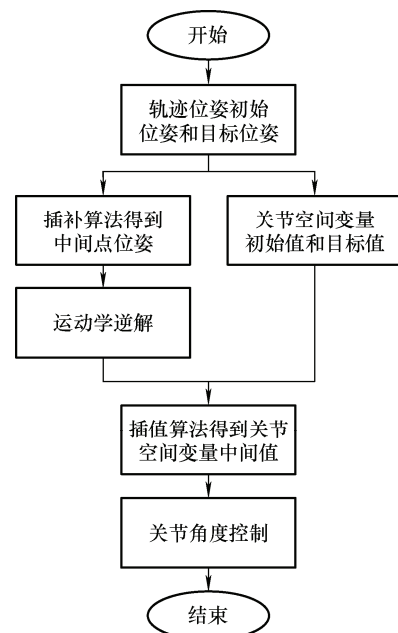


图 10 轨迹规划流程图

表 2 关节空间与笛卡儿空间轨迹规划特点比较

规划空间	关节空间	笛卡儿空间
样例	德国的 RepoRobo 股骨干骨折复位机器人；东南大学朱庆的股骨干骨折复位机器人。	泰勒空间支架的骨外固定器；哈尔滨工业大学蔡鹤皋院士课题组的 6-PTRT 并联型结构复位机器人。
优缺点	简单、计算量小、不会发生奇异现象，控制简单；串联型机器人有累计误差，并联型机器人不可控，轨迹不直观。	末端轨迹直观且精度高；计算量大、出现奇异问题。
适用场景	对末端运动轨迹任务要求不严格的机器人。	对末端轨迹任务要求有特殊要求且精度高。
目前研究进展	机器人设计研究较多，得益于其控制简单，但是精度和安全性问题一直未得到验证。	机器人设计研究较多，但是动平台的轨迹规划研究不足。

2.2.2 根据规划目标不同

根据轨迹规划过程是否采用最优化方法进行轨迹规划可以将其分为基本的轨迹规划方法和最优化目标轨迹规划方法。基本的轨迹规划方法指的是直线圆弧曲线拟合、梯形速度曲线插值、多项式方程及 B 样条曲线插值拟合等方法^[40]。最优化目标轨迹规划方法是在综合考虑任务要求的前提下，实现机器人的精度最优、能量最优、时间最优以及机器人安全性和损害最小等目标^[41]的规划方法。根据解决问题的数目，最优化目标轨迹规划可以分为单目标轨迹优化和多目标轨迹优化。

在实际应用中, 轨迹曲线以直线、圆弧以及多项式方程插值拟合为主。ZHAO 等^[42]采用五次多项式对钢索悬吊机器人的末端执行器进行轨迹规划并验证了方法的可行性。YANG 等^[43]采用三次多项式对人体血管的形状进行拟合作为微创血管介入机器人的运动轨迹。样条曲线在路径点过度和曲线平滑度方面的优势更大, 但由于曲率变化大、计算复杂等因素, 导致其普及度较低。如 JAHANPOUR 等^[44]通过使用 NURBS 曲线方法对基于 CAD 的并联机器人进行轨迹规划, 提出了一种在一定时间内恒速进给剖面的运动方案。由此, 改进曲线的应用对于提高轨迹性能具有重要的意义。

针对单目标问题的求解方向, 学者们通常集中在轨迹长度最优^[33]、精度最优^[45]、时间最优^[46]、能量最优^[47]以及冲击最优^[48]等目标问题上。通过对机器人进行运动学或者动力学建模从而建立约束, 完成对优化问题的数学语言总体框架描述, 进而选择合适的优化算法进行求解。孙志毅等^[49]把 4-3-3-3-4 多项式作为挖掘机自主作业时的轨迹规划方法, 并用差分进化算法优化轨迹, 有效缩短了其运行时间; WANG 等^[50]根据建立的电缆铲(LCS)动力学模型定义了作业过程中的能量消耗函数并进行优化; VASS 等^[51]根据最大关节加速度和冲击的特性, 提出了改进的冲击转换轨迹规划算法。总的来说, 在运动学和动力学模型的约束下, 对路径长度最优的求解方式通常是建立长度计算的数学表达式作为优化函数, 对时间最优通常的处理方式是提高速度或者缩短路径来达到目标; 对能量最优通常是直接定义能量消耗函数来进行优化求解; 对冲击最优通常是对轨迹加速度的优化。

针对多目标问题的数学描述, 关键在于综合考虑上述单目标问题对实际的影响, 通常是上述单目标的排列组合, 如时间-能量最优、时间-冲击最优、实现避障的同时路径最短等。浦玉学等^[52]针对工业机器人时间最少、能耗最优的目标, 利用改进引力搜索算法进行优化, 并说明了算法的优越性; GASPARETTO 等^[53]以时间最短和冲击最优为目标, 通过为其赋予不同的权重转化为单目标函数问题进行求解。总的来说, 针对多目标问题通常的解法一是在算法的改进上, 二是将多目标问题转化为单目标优化问题, 进而用优化算法进行求解。

机器人运动过程中能够有效躲避障碍物是检验轨迹规划安全性的重要指标, 因此避障问题成为广大学者研究的热点。针对避障问题通常的解法是将

碰撞检测技术与轨迹规划方法相结合, 从而把避障问题转化为空间中点到点的距离判断问题。有些学者将最优化方法引入到避障问题的求解中, 能够得到满足安全性以及运动性能的轨迹。杜海龙^[54]首次在骨折复位机器人轨迹规划中提到了将碰撞检测理论应用于路径优化算法中, 并通过虚拟技术模拟了骨折复位的路径, 实现了生物接骨治疗的量化; 马宇豪等^[55]提出了一种基于六次多项式轨迹的机械臂避障思路, 并采用遗传算法在关节空间中规划出了一条无碰撞的理想运动轨迹; 曾德全等^[56]针对三次 B 样条的轨迹生成设计了一种高实时连续规划算法, 能够在执行器和安全距离约束条件下完成移动机器人的轨迹规划; CHWA 等^[57]利用 B 样条曲线在关节空间中进行轨迹规划使得机械臂可以合理避障。

当前, 工业机器人的轨迹规划研究取得了很多的成果, 相关学者利用优化算法以及多样的空间曲线完成并且优化了各个领域的任务, 但是创伤骨科机器人轨迹的规划和优化问题仍然处于起步阶段。虽然学者对轨迹问题进行了数学描述, 但是医疗手术机器人轨迹优化的目标与工业机器人的量化标准不同, 轨迹规划存在着求解方法可知优化目标不明的问题。

3 轨迹规划求解方法

不同领域的机器人其适用的轨迹规划方法不同, 如快速随机搜索树(RRT)研究的重点在于对环境的感知、处理以及规划, 所以更适用于移动机器人的轨迹规划问题。在工业机器人的轨迹规划方法中应用最广泛的是基于曲线拟合的算法, 如多项式拟合, 其研究的重点在于对任务的要求做出合理的轨迹规划。随着应用问题的多样化, 算法的适用范围变得越来越模糊, 相关学者开始从具体问题具体分析的角度出发选择合适的方法进行求解, 如在航天器的交会与接近操作问题^[58]上以及在柔性针的穿刺问题^[36]上采用最优策略的 RRT 算法。总体来讲, 机器人轨迹规划的求解可以从机器人分型、规划空间以及规划问题适用的算法三个角度进行求解构思。

3.1 根据结构类型的轨迹规划方法选择

串联型医疗机器人具有灵活性强的特点, 但是由于关节之间的传递性导致其存在误差的累积^[59], 因此精度问题一直是此种机器人的研究难点。姚立纲等^[60]结合康复运动安全性要求及效果确定了混

联式踝关节康复装置的运动轨迹,实现了良好的康复效果;柯振辉等^[61]研究了串联机器人的轨迹精度,证明了动态误差源对末端轨迹影响要大。鉴于关节运动灵活以及利用 D-H 等建模方式的特点,在关节空间中进行轨迹规划方法成为串联型机器人轨迹规划方法的主流,其只需要考虑机器人运动过程的准确性以及可靠性(即在工作空间中的避障问题)即可,不用考虑轨迹规划的中间过程。但是需要不断的进行笛卡儿空间坐标系和关节空间坐标系之间的计算转化,使得计算量会随着结构复杂性的提高而增大,同时其逆解运算比较复杂,所以笛卡儿空间坐标系的轨迹规划方法不太适合串联型医疗机器人^[62]。

并联型医疗机器人在骨科领域应用广泛得益于其精度高以及输出力矩大等特点,但是并联机器人末端平台和驱动杆之间的非线性关系使得其末端轨迹存在轨迹偏移不可控、控制难度大等问题。目前并联机器人的轨迹规划方法有两种思路:① 对输出曲线进行拟合并且离散化,通过逆运动学求解离散点位置的反解,在把这些反解作为输入驱动求得末端运动轨迹,这种方法准确度高,能够实现末端控制器的精度控制;② 选择期望轨迹上的若干点然后运用逆运动学方法求解出其在驱动空间的位置参数,将这些反解得出的位置拟合成以时间为变量的函数进行显示表达,然后将函数离散化作为输入求解出动平台的运动轨迹,可以得到动平台的速度和加速度变化过程。如彭斯洋^[63]运用七次多项式对关节变量进行拟合作为输入验证了驱动的可行性;刘文彩等^[64]利用弗莱纳-雪列空间三元矢量原理规划了 6-SPU 并联机器人末端执行器的位姿变化;LI 等^[65]结合外固定器的逆运动学求解方法采用等距离调整策略规划了矫正平台的运动轨迹,结果显示轨迹平滑均匀。

3.2 根据规划空间的轨迹规划方法选择

3.2.1 关节空间轨迹规划

关节空间轨迹规划的算法设计简单并且实现效率较高,所以在机器人运动规划研究问题中十分常用。关节空间轨迹规划方法又可以分为多项式插值法、线性插值法以及样条曲线插值法等。

三次多项式型方程^[66]的结构如公式 1 所示。在机器人轨迹规划研究中,在已知初始位置和目标位置的前提下,可以通过对其速度进行约束求得多项式方程。 θ_0 和 θ_f 表示初始位置和目标位置, t_0 和 t_f 表示初始时刻和终止时刻, v_0 和 v_f 表示初始速度和终止速度,机器人关节变量采用三次多项式插值如

下式所示

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (1)$$

对上述公式进行一阶和二阶求导可以得到关节变量的速度和加速度表达式,并结合速度、位置和时间约束条件可以得知

$$\begin{cases} \theta(t_0) = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2 + a_3 t_0^3 = \theta_0 \\ \theta(t_f) = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 = \theta_f \\ \dot{\theta}(t_0) = a_1 + 2a_2 t_0 + 3a_3 t_0^2 = v_0 \\ \dot{\theta}(t_f) = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 = v_f \end{cases} \quad (2)$$

求解上述方程组就可以得到未知系数的大小从而得到三次方程式的表达式。

在实际的应用过程中加速度的约束对机器人的启停具有重要的影响,对电机具有保护作用。结合初始和终止时刻加速度的约束可以得知,方程式数目增加到六个,故最少采用五次多项式求解才能实现对机器人关节变量位置、速度和加速度的约束。与三次多项式方程相似,五次多项式^[67]轨迹规划方程为

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (3)$$

对其进行一阶和二阶求导得到速度和加速度公式,在三次多项式约束条件的基础上,设置其初始时刻和终止时刻的加速度约束为 θ_0'' 和 θ_f'' , 结合边界条件可以得知

$$\begin{cases} \theta(t_0) = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2 + a_3 t_0^3 + a_4 t_0^4 + a_5 t_0^5 = \theta_0 \\ \theta(t_f) = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5 = \theta_f \\ \dot{\theta}(t_0) = a_1 + 2a_2 t_0 + 3a_3 t_0^2 + 4a_4 t_0^3 + 5a_5 t_0^4 = v_0 \\ \dot{\theta}(t_f) = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 + 4a_4 t_f^3 + 5a_5 t_f^4 = v_f \\ \ddot{\theta}(t_0) = 2a_2 + 6a_3 t_0 + 12a_4 t_0^2 + 20a_5 t_0^3 = \theta_0'' \\ \ddot{\theta}(t_f) = 2a_2 + 6a_3 t_f + 12a_4 t_f^2 + 20a_5 t_f^3 = \theta_f'' \end{cases} \quad (4)$$

求解上述方程组就可以得到未知系数的大小从而求得五次方程式。相比较于三次多项式,五次多项式添加了加速度的约束项,能够解决三次多项式方程速度变化不平滑和加速度出现跳变等问题。

3.2.2 笛卡儿空间轨迹规划

三维空间中曲线的表示方法有一般表示法、样条曲线表示法以及三角函数表示法。大多数机器人完成的末端执行器的简单运动轨迹就是直线和圆弧的组合。常用的样条曲线插值方法有 B 样条函数^[68]以及非均匀有理 B 样条函数^[69]等。

空间直线插值法是在已知初始位姿和终止位姿

的前提下进行等间距或者等时的对路径点位姿进行插值的方法。理想的直线规划存在加速、匀速以及减速阶段, 机器人在开始以恒定加速度运动到一定速度进而以最大速度匀速运动最后以恒定加速度减速到初始速度, 正好到达终止位置。如在匀速条件下的直线插值仿真, 假设空间中始末两点的三维坐标分别为 $A(x_0, y_0, z_0)$ 和 $B(x_f, y_f, z_f)$, 如图 11 所示。

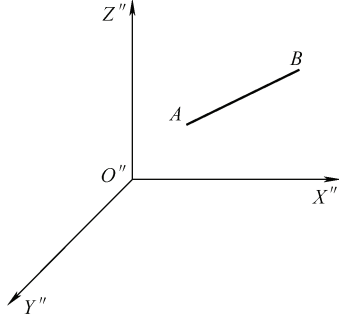


图 11 笛卡儿空间坐标系下的坐标点

假设执行器沿着直线运动的速度为 v , 插补时间间隔为 t 。通过计算 AB 两点之间的距离, 结合速度和时间间隔可以得到插补点个数

$$\begin{cases} L = \sqrt{(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2 + (z_f - z_0)^2} \\ \mathbf{R} = \mathbf{R}_0^T \mathbf{R}_f \\ d = v \cdot t \\ N = \frac{L}{d} + 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, L 代表的是空间始末点之间的距离, \mathbf{R}_0 代表的是 A 的位姿旋转矩阵, \mathbf{R}_f 代表的是 B 的位姿旋转矩阵, \mathbf{R} 是从 A 运动到 B 的相对位姿变换矩阵, 通过四元素表示法可以将 \mathbf{R} 转化为绕固定轴旋转的表示方法, 即

$$\mathbf{R} = [\mathbf{K}, \theta] \quad (6)$$

通过对角度进行插补可以实现姿态的变换, 在这里不多余赘述。通过上式可以得知相邻插补点的增量为

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{x_f - x_0}{N} \\ \Delta y = \frac{y_f - y_0}{N} \\ \Delta z = \frac{z_f - z_0}{N} \end{cases} \quad (7)$$

从而可以得到匀速过程中的插补点的坐标为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + i\Delta x \\ y_{i+1} = y_i + i\Delta y \\ z_{i+1} = z_i + i\Delta z \end{cases} \quad (8)$$

在其他速度要求下同样可以实现不同速度约束的直线插值坐标。使用 $p_0=[1,1,1]$ 和 $p_f=[4,4,4]$ 作为始末点进行空间直线插补法仿真结果如图 12 所示。

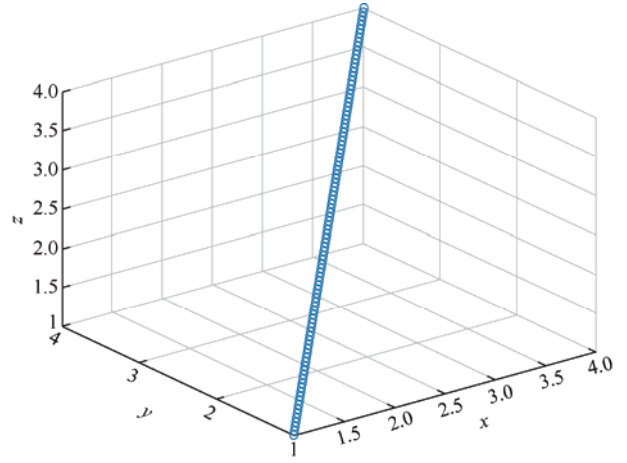


图 12 直线插值仿真结果

空间圆弧轨迹规划是以规划空间中的一点为圆心进行圆弧曲线插补的方法, 一般分为空间中的圆弧轨迹规划和平面中的圆弧轨迹规划。张三元等^[70]在 1999 年利用圆弧/直线插值三维空间曲线实现了整体的连续, 表明了直线和圆弧曲线的通用性。如在空间中的圆弧插值仿真, 假设空间中存在三个不共线的点 $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$ 和 $C(x_3, y_3, z_3)$, 分别做出 AB 和 BC 的公垂线, 其交点即为圆心 $O'(x_0, y_0, z_0)$ 所在处, 同时连接 $O'C$ 就可以确定以 O' 为圆心, $O'C$ 为半径的圆。如图 13 所示。

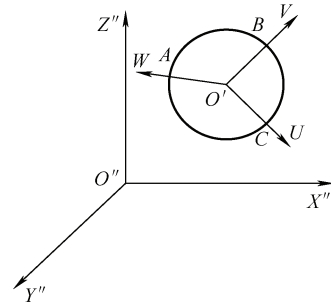


图 13 空间圆弧插值法原理示意图

由 $O'C$ 的长度可以得知过 A 、 B 和 C 三点的圆的半径长度 r 为

$$r = \sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + (z_3 - z_0)^2} \quad (9)$$

然后在圆心处建立新坐标系 UVW , 求得新坐标系坐标轴的单位矢量以计算笛卡儿坐标系和新坐标系之间的转化关系。以 $O'C$ 为 U 轴, 计算其单位矢量为

$$u = \frac{O'C}{\left| \overrightarrow{O'C} \right|} \quad (10)$$

然后通过 O' 点作垂直于圆所在平面的法矢量建立为 W 轴, 并且求得单位矢量为

$$w = \frac{AB \times BC}{|AB \times BC|} \quad (11)$$

确定了两个坐标轴以及其单位矢量之后, 通过右手法则, 可以确定 V 轴的方向, 进而求得单位矢量为

$$v = uw \quad (12)$$

从而得到笛卡儿坐标系 $O''X''Y''Z''$ 和新坐标系 $O'UVW$ 之间的转换关系为

$$T = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & x_0 \\ u_y & v_y & w_y & y_0 \\ u_z & v_z & w_z & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过坐标系之间的转化关系可以计算笛卡儿坐标系中的点在新坐标系中的坐标。在新坐标系平面内进行圆弧插值后反解回笛卡儿坐标系即可求得插值点的坐标。首先计算 ABC 三点在新坐标系中的坐标为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ 1 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ 1 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ 1 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

得知其在新坐标系下 W 轴方向的大小为 0, 进而将空间中的圆弧插值转化为在平面内的圆弧插值, 求得整个圆弧插值的角度 θ 为

$$\theta = \begin{cases} \arctan(u_1/v_1) + 2\pi, v_1 \leq 0 \\ \arctan(u_1/v_1), v_1 > 0 \end{cases} \quad (15)$$

对圆弧角度进行均匀插值, 设插值个数为 λ , 可以得到

$$\begin{cases} \theta_i = \frac{i}{\lambda} \theta \\ u_k = r \cos(\theta_i) \\ v_k = r \sin(\theta_i) \\ w_k = 0 \end{cases} \quad (16)$$

得到新坐标系下圆弧点的坐标值后, 通过坐标转换关系可以得到其在笛卡儿坐标系中的坐标值为

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ w_k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

通过上式可以计算经过 ABC 三点的圆弧离散插值点, 即可完成空间的圆弧轨迹规划。圆弧曲线控制法下对空间姿态的调整同样可以使用四元素法进行描述, 和直线控制法相同, 在完成位置和姿态的规划后即可控制机器人的运动。通过 $a=[1,4,1]$, $b=[3,4,5]$ 和 $c=[1,4,6]$ 三点并且设置插值个数为 60, 进行仿真可以得到仿真图(图 14)。

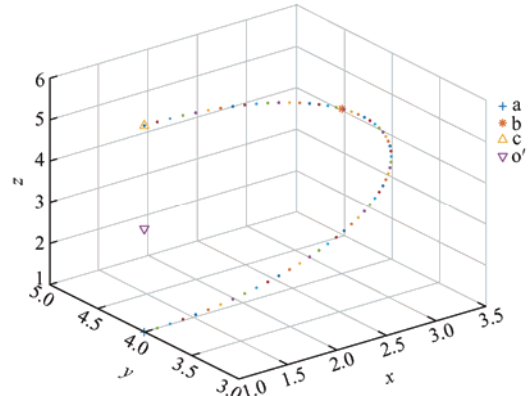


图 14 圆弧插值仿真结果

3.3 轨迹规划算法及改进

目前有学者将路径规划算法大致分为基于数值计算的路径规划算法和基于搜索的路径规划算法^[36]。基于数值计算的路径规划包括有基于曲线拟合的算法、基于数值优化的算法等, 基于搜索的路径规划方法有基于人工势场的快速搜索算法以及基于采样的算法等。

3.3.1 基于曲线拟合的规划方法

基于曲线拟合的算法通常是对路径的节点进行平滑的拟合, 从而可以综合性的考虑路径的物理可行性、安全性、稳定性等因素。通常的曲线拟合类型有直线和圆弧、多项式曲线、样条曲线等^[71-72]。直线和圆弧是轨迹规划中最基本的曲线, 但是这两种曲线灵活性低, 难以保证曲率变化的连续性, 不适用于环境复杂的场景。ELIEL 等^[71]利用机器人规划静脉穿刺的路径, 在 45 例临床试验中仅失败了 2 例, 而且位移误差在 3.9 mm 范围内, 证明了系统的有效性, 然而在引导过程中仅仅考虑了直线运动, 并不符合静脉穿刺的运动学规律; YE 等^[73]提出了最短直线路径下的骨折复位步骤, 通过提取路径上的关键点信息控制机器人完成复位, 仅仅对复位的路径进行了仿真。多项式曲线拟合被广泛应用于轨

迹规划问题中,通过速度/加速度等边界条件进行约束实现曲线的位置、速率以及加速度等连续。更为复杂的是基于样条曲线的路径规划方法,可以对曲线进行分段表示并且对每一段曲线结合边界条件的约束获得总体曲线变化的连续性,样条曲线有比较好的扩展性,如 B 样条曲线、NURBS 曲线等。非均匀有理 B 样条曲线(NURBS)函数能够解决 B 样条函数插值易产生突变的问题,所以应用更加广泛。目前相关学者正致力于对曲线的改进以提高机器人运动的性能。

并联机器人的轨迹规划问题在 2014 年由李孟歆等^[74]进行了简单的描述,通过直线插补算法和圆弧插补算法分别求取 3TPS/TP 型并联机器人的轨迹,验证了直线插补算法和圆弧插补算法在并联机器人应用的有效性。WANG 等^[75]利用三次样条曲线规划机器人的运动轨迹,并且通过 SQP-F 算法对最有轨迹进行了仿真从而验证了轨迹规划方法应用于康复训练的有效性。曲线拟合的轨迹规划方法经历了由直线、圆弧向 B 样条曲线的转变,对曲线的改进还会持续下去。

3.3.2 基于数值优化的规划方法

基于数值优化的算法通过将轨迹规划问题转化为数学优化问题进行求解。其数学表达式如公式 18 所示,首先把约束条件用数学表达式描述出来,然后将规划问题转化为目标函数求解的形式,通过使用优化方法进行求解从而得到轨迹。这种方法在轨迹规划及优化中使用广泛,但是对优化问题的理解程度要求很高,有时需要结合碰撞检测技术进行避障的轨迹规划

$$\begin{aligned} \min & f(u(t), t) \\ \text{s.t. } & g(u(t), t) \leq 0 \\ & h(u(t), t) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $u(t)$ 表示控制输入; $g(t)$ 表示不等式约束; $h(t)$ 表示等式约束; $f(t)$ 表示轨迹规划问题的数学描述,以上数学语言描述了问题的总体框架。

国家康复辅具研究中心与河北工业大学^[76]联合研制了一款基于 Stewart 平台的外固定支架系统,利用蚁群算法优化了轨迹偏差,但是算法运行时间长;张伟^[77]利用 Matlab 工具箱对设计的仿生青蛙机器人运动轨迹进行了优化,实现了最小化的驱动功输入下的运动轨迹,但是未对算法进行改进提高其性能;郭娟^[78]通过 B 样条曲线对双臂机器人的关节空间进行轨迹参数化,利用粒子群算法对机器人末端输出误差进行优化提高了其运动精度克服了其动

力学奇异性问题;张玲^[79]等利用遗传算法对轮式机器人的输出能量进行最优轨迹规划控制,验证了算法的有效性以及降低了控制误差。

3.3.3 基于图搜索的规划方法

基于图搜索算法的关键在于将环境进行离散化表达,使用离散图的形式来表征场景状态。这种方法是在静态环境中求解最短路径最有效的方法。常用的图搜索算法有 Dijkstra 算法以及 A* 算法。Dijkstra 算法通常用于图最短路径的搜索过程。A* 算法在 Dijkstra 算法的基础上引入启发式函数提高了搜索效率。KODAGODA 等^[80]将马尔科夫模型应用于改进的 A* 算法中,通过学习人类的运动模式来解决机器人的动作决策问题,提高了其在线学习能力;TANG 等^[81]将人工势场法和混合 A* 算法结合优化了生成的路径,减少了 A* 算法规划过程中转向动作的次数和路径的最大曲率;BUSCHBAUM 等^[82]把 OpenSim 预测的肌肉力以及碰撞检测结果作为约束,把路径成本与肌肉力大小作为成本函数,在 CT 形成的三维模型下采用改进的 A* 算法搜索得到了无碰撞最小力复位路径,仿真结果表明其位移误差小于 0.9 mm,角度误差小于 2.8°,手动复位路径下的肌肉力比此路径高至少 2 倍。

3.3.4 基于人工势场及采样的规划方法

人工势场法通常用于全局路径规划问题中,通过设计引力场函数和斥力场函数来规划机器人的轨迹。势场函数的设计影响着算法的规划能力,其中斥力场的存在能够实现运动过程中的避障。由于引力和斥力在障碍物附近会出现合力为 0 的情况,因此不适用于局部的路径规划问题。同时,势场函数的固定表示使得其不适合动态环境下的轨迹规划。陈劲峰等^[83]针对人工势场法出现局部最小值的问题,引入逃离或穿越的策略实现了改进算法的动态避障能力;马小陆等^[84]提出了基于势场跳点的蚁群算法解决了原算法路径规划收敛速度快、容易陷入局部最优等问题,通过引入势场合力递减系数解决蚁群算法容易陷入局部最优问题,以及引入跳点搜索算法提高了搜索效率。

在机器人领域,基于采样的算法得到了广泛的应用,通过在复杂环境中随机选取位置可以使机器人快速寻找到可行的数值解,代表方法有 PRM、RRT 等。这种方法不仅规划速度快,而且可以在规划的过程中考虑机器人的运动学约束,但是算法寻找到的轨迹是次优解。刘密等^[85]提出了基于碰撞以

及贪心规则的 RRT 算法解决了复杂结构条件下零部件装配路径求解困难的问题并验证了方法的高效性;张伟民等^[86]通过引入目标导向策略验证了改进 RRT 算法的规划效率相比较于 RRT 高的能力以及有效性和优越性;陈瑛^[58]通过将航天器的动力学模型约束引入到 RRT 算法中解决了航天器交会与接近操作难以得到解析解的问题。基于采样的算法可以有效解决复杂环境下的轨迹规划问题,避免了解析过程中复杂的计算,但是其搜索策略需要扩展以实现最优规划。

3.3.5 基于机器学习算法模型的规划方法

机器学习算法通过建立预测模型来感知环境和对动作作出决策,来模拟或者实现人类的学习行为。近年来机器学习算法逐渐引入到机器人的轨迹规划中^[87-88],促进了路径规划的智能化速度。神经网络被学者们应用到轨迹跟踪控制方法上,得益于其对数据强大的学习能力从而实现对轨迹的预测^[89],但是这种方法计算量大且降低了控制的实时性。强化学习^[90]成为机器人轨迹规划研究的热门算法,让机器人根据环境感知自主学习从而实现轨迹的规划^[91],克服了对环境未知情况下的避障问题,提高了机器人躲避危险的能力^[92]。但是在实际情况中,环境的复杂多变对算法的搜索能力、实时性等性能提出了更高的要求。

当下基于数值优化以及搜索算法的求解方法使得轨迹规划的速度和质量得到了显著的提升,解决了很多难以显式表达的空间轨迹问题,促进了机器人路径规划的发展,我们应该积极地将机器人轨迹规划方法用于骨折复位及畸形矫正问题的解决,但是智能算法仍然存在着复杂环境下收敛、搜索能力提升空间大、实时性等问题。因此,智能算法的应用与改进对于骨折复位及畸形矫正机器人的轨迹规划以及控制具有重要的意义。

4 存在问题及发展趋势

4.1 现存问题

综上所述,骨折复位及畸形矫正机器人在辅助医生解决临床问题上取得了很大的进步,显示出了广阔的应用前景,但在轨迹规划等方面仍然存在着诸多问题^[93]。

4.1.1 定位和轨迹跟踪存在误差

畸形骨或者断骨的位姿检测与轨迹跟踪是决定机器人精度好坏的关键。FU 等^[94]利用 PID 控制方

法完成了自主设计的基于 Stewart 平台的骨折复位机器人在模型骨上位移误差在 1mm、旋转角度误差在 1.8° 范围内的模拟实验;BUSCHBAUM 等^[95]利用 CT 重建断骨截面,使用 ICP 算法计算截面之间的相对位姿矩阵,通过模型骨进行检验得到了位移误差在 0.9 mm 内、旋转角度误差在 2.8° 以内的结果,该结果满足临床需求。虽然大部分机器人^[96-98]辅助骨折复位在模型骨上进行了试验,但是仍然存在误差。由此,精准复位是未来的发展方向。

4.1.2 轨迹安全性未得到验证

轨迹规划的安全性体现在断骨之间不能够发生碰撞^[35],因此目前多数研究采用先将骨骼牵拉开,然后矫正角度和侧方移位,最后实现对接的复位步骤^[94],然而并不是所有的断骨重建与重塑都需要这样的步骤,如分离式骨折。同时,肌肉力是阻碍机器人运动的因素,与人体安全性密切相关,其数值是变化的且最大合力为 411 N^[99],克服这种阻碍对机器人是一个挑战。然而,这些数值多数是基于 hill 肌肉理论得到的,只运用了模型中肌肉的被动力,并在此情况下仿真得到了直线轨迹下运动杆的输出力在 0~600 N 之间^[100],所以其合理性与否一直未得到验证。此外,人体肌肉力、机器人输出力的大小与机器人的运动轨迹密切相关,如果机器人输出力过大会造成肌肉的损伤^[101]。骨外固定器用于畸形矫正一直都是人工操作,这导致了矫正轨迹的多样性,将造成病人的伤害。张习帅等^[102]规划了矫正路径并对其进行了优化,使得位置偏移占比平均减少了 49.45%,减少了病人的疼痛。因此轨迹规划对人体安全性至关重要。然而,轨迹的安全性未得到临床验证,成为制约骨折复位及畸形矫正机器人发展的因素。

4.1.3 人体生理机制研究不足

人体生物模型的建立和分析对于揭示人体本身在各种状态下的特性具有积极的意义,其是骨折复位及畸形矫正机器人控制及轨迹规划研究的重要理论依据,如复位力的大小等。同时,骨骼创伤部位附着有肌肉等软组织,在运动过程中会牵引软组织的运动从而形成一种动态的刚柔耦合环境。由此,骨折复位及畸形矫正轨迹规划的关键在于如何建立与人体环境相匹配的精确模型。目前,hill 肌肉理论^[103]、力学实验的测量以及传感器技术的应用以及 Abaqus、OpenSim^[104]等肌骨模型研究的主流方法与软件,能够实现软组织力学等特性的分析与预测,

但是仍然存在模型精准度不足、误差大等问题,无法满足骨折复位及畸形矫正过程中人体相关生理机制构建的要求,在闭合复位条件下,以上问题尤为突出。

究其原因,一方面,因为人体是一个由骨骼、肌肉、神经系统等多因素作用的复杂系统,不同个体之间具有明显的差异性,难以建立通用且适用的生物模型。另一方面,目前的人体试验材料(尸体)稀缺,且研究方法过于保守,对于人体特性的测量和分析数据量偏少。此外,骨折复位及畸形矫正机器人的应用对象是人体,在研究的过程中需要多学科交叉和融合,目前深度的医工融合机制尚未完全建立。

4.1.4 临床标准缺乏

对于骨折复位,尽管传统的中医正骨技术已经得到了大量的临床证实^[105],但是目前尚缺乏统一的流程和标准^[106],很多内在的治疗原理难以系统表达,且不同医生的意见不一,很难量化统一。如NEEDLEMAN^[107]从医学角度出发提出了“glide path”的准确复位方法,然而依赖于人进行手动操作,对复位路径未进行参数化的描述。同时,对于畸形矫正,由于先天畸形的千差万别,病因的复杂多样,及医生个人截骨重建方式的不同,很难形成统一的标准。由此,如何建立统一有效的临床标准,并进行数字化、参数化是当前尚需解决的关键问题。其次,相对临床医生丰富的手术经验,现有的机器人技术还缺乏自主的智能化。虽然相关研究学者已经提出了一些办法来解决骨折复位及畸形矫正过程中的路径规划问题,但是其多是针对特定问题的解决。随着骨折类型及畸形程度的改变,其灵活性显著降低,极大地影响了复位的质量和畸形矫正的疗效。

综上所述,如何将临床标准与机器人技术相结合,利用图像处理、轨迹规划、人工智能等技术,在保证临床疗效的前提下,自主规划出一条智能化的轨迹是当前提高骨折复位及畸形矫正机器人临床适用性,亟待解决的问题^[108]。

4.1.5 轨迹规划方法单一且性能低

轨迹规划与骨折复位及畸形矫正的处方设计具有同等作用,决定着治疗的效果。然而,目前的轨迹规划技术在复位过程中优化目标的选择上仍然没有提出和医学紧密结合的对象,因此将优化算法引入到骨折复位及畸形矫正机器人的研究

当中具有重要的意义。如在复位过程中肌肉等生物特性对机器人的影响^[100]等问题仍然未得到解决,使得机器人在临床上应用的安全性无法得到有效保证。其次,随着机器人优化目标的复杂性以及骨折复位与畸形矫正过程的复杂性迭代,为了满足机器人运动过程中的性能要求,插补曲线的阶次会越来越高,导致计算求解难度不断提高,难以获得有效的解析解,急需高效的轨迹规划算法。同时,在优化算法方面,虽然改进的群体优化算法本身的搜索能力以及收敛性得到了很大的提升,但是目前还没有一种算法可以同时满足全局最优、求解精度高、实时性强等要求。如在基于采样的算法方面,人工势场法在复杂环境上势场函数的设计更加复杂,而且难以保证全局收敛性,RRT 算法虽然得到了改进,但是距离最优路径还是有一定的差距,在节点利用率、改进最邻近搜索算法等^[109]方向上仍然需要进一步提高。尽管相关学者为了不同的目标函数,赋予不同的权重,将多目标函数转化为单目标函数进行求解,从而简化了多目标问题的描述,但是这种处理方式不能综合考虑所有因素,对实际情况的把控能力会严重降低^[110-114]。

4.2 发展趋势

4.2.1 肌骨一体化的刚柔耦合约束

人体结构涉及骨骼和软组织,建立与人体匹配的准确模型,考虑肌骨一体化的轨迹规划方法将是未来的发展趋势之一。通过建立逼真以及准确的三维模型与力学模型等表征人体特性能够为骨折复位及畸形矫正机器人的轨迹规划与控制提供理论基础。同时,人体肌肉力的表征与患者安全以及机器人性能密切相关,在解决复位路径的过程中需要综合考虑人体生物特性的影响,将生物力学与机器人相结合,设计优化目标以提高机器人复位轨迹的质量,满足机器人非结构化环境下的复杂任务作业。

4.2.2 临床应用标准的规范化及数字化

骨科疾病治疗标准化、数字化是医疗机器人广泛应用的前提之一,也是未来发展趋势之一。相对工业机器人,医疗机器人在应用于临床的轨迹规划研究过程中需要考虑繁多的因素,必须要将机器人轨迹规划方法与相关医学临床标准相结合,才能真正实现辅助人或代替人的目的。同时,骨折复位及畸形矫正的路径要结合相关病例具体分析,并结合

临床经验,才能设计合适的优化目标,以实现轨迹的高效优化和求解。此外,轨迹规划路径曲线以及规划算法的选择不仅要满足治疗过程中的高性能运动要求,也要在满足精度的同时保证人机的能耗比和效率值,深度的“医工融合”机制及交叉技术将成为未来发展的方向。

4.2.3 高效的智能轨迹规划方法

随着规划算法实时性、搜索能力以及求解精度等要求之间的矛盾日益突出,规划算法的改进必然成为促进机器人运动规划的发展趋势之一,其体现在曲线的改进、算法策略的改进等方面。人体环境的复杂性导致了断骨复位及畸形矫正过程的复杂性,现有的路径规划方法在医疗领域的应用导致其与其他类型的机器人的路径规划策略略有不同,因此在满足治疗要求的前提下需要对算法进行改进以提升其自适应能力和性能。如在 RRT 算法中引入目标导向策略以满足其收敛性,引入最优控制策略以实现轨迹优化等。同时,结合运动及规划环境约束利用智能算法得到最优轨迹也是解决方案之一^[113]。此外,图像处理技术的发展为复位路径提供了保障,虚拟现实技术为手术提供了术前规划,因此与图像处理技术以及虚拟现实技术结合的实时路径规划算法,将有力的提高手术的安全性以及准确性。

5 结论

轨迹规划研究是骨折复位及畸形矫正机器人运动控制的前提,决定着机器人治疗的质量。随着骨折复位及畸形矫正机器人技术的深入研究,其在已经取得了阶段性的研究进展,展现出了广阔的应用发展空间。然而,目前骨折复位及畸形矫正机器人轨迹规划方法的研究,仍落后于结构设计的发展,在临床应用上存在精度低、安全性不足等问题。究其原因,主要体现在人体肌骨建模研究不深、轨迹规划未考虑生物特性、临床标准缺失、与机器人技术结合不足、优化算法智能化程度不足等方面。因此,未来,骨折复位与畸形矫正机器人轨迹规划将注重在肌骨一体化规划、深度医工融合、规划曲线改进、算法智能化改进等方面。本文综述分析,可以为相关领域机器人的轨迹规划提供参考和建议,对于促进机器人轨迹规划发展,医疗机器人临床应用具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 王岩. 坎贝尔骨科手术学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2009.
- [2] 胥少汀, 葛宝丰, 徐印坎. 实用骨科学[M]. 3 版. 北京: 人民军医出版社, 2005.
- [3] 王庆生. 股骨干骨折钢板内固定术后不愈合 21 例原因分析[J]. 中国医药导报, 2008(32): 143-144.
- [4] 杜志江, 孙立宁, 富历新. 医疗机器人发展概况综述[J]. 机器人, 2003(2): 182-187.
- [5] WESTPHAL R, O'LOUGHLIN P F, KENDOFF D, et al. A rat model for evaluating physiological responses to femoral shaft fracture reduction using a surgical robot[J]. Journal of Orthopaedic Research, 2008, 26(12): 1656-1659.
- [6] GANGER R, RADLER C, SPEIGNER B, et al. Correction of post-traumatic lower limb deformities using the Taylor spatial frame[J]. International Orthopaedics, 2010, 34(5): 723-730.
- [7] 吴冬梅, 杜志江, 贾志恒, 等. 机器人辅助正骨手术系统虚拟环境精确建模方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(6): 859-861.
- [8] WESTPHAL R, WINKELBACH S, GOSLING T, et al. A surgical telemanipulator for femur shaft fracture reduction[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2006, 2(3): 238-250.
- [9] FUCHTMEIER B, EGERSDOERFER S, MAI R, et al. Reduction of femoral shaft fractures in vitro by a new developed reduction robot system 'RepoRobo'[J]. Injury, 2004, 35(1): 113-119.
- [10] FMAEDA Y, SUGANO N, SAITO M, et al.

- Robot-assisted femoral fracture reduction: Preliminary study in patients and healthy volunteers[J]. *Computer Aided Surgery*, 2008, 13(3): 148-156.
- [11] 秦泗河, 夏和桃, 彭爱民, 等. 胫骨与跟腱同步弹性延长器的设计与临床应用[J]. *中华外科杂志*, 2004(19): 8-11.
- QIN Sihe, XIA Hetao, PENG Aimin, et al. The design and application of synchronized springy lengthening apparatus for the tibia and tendo calcaneus[J]. *Chinese Journal of Surgery*, 2004(19): 8-11.
- [12] 龚敏丽, 徐颖, 唐佩福, 等. 3 维 CT 图像导航的并联机构辅助股骨复位方法[J]. *机器人*, 2011, 33(3): 303-306, 346.
- GONG Minli, XU Ying, TANG Peifu, et al. 3D CT image-guided parallel mechanism-assisted femur fracture reduction[J]. *Robot*, 2011, 33(3): 303-306, 346.
- [13] THOMAS G, ROLF W, JENS F, et al. Forces and torques during fracture reduction: Intraoperative measurements in the femur[J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2006, 24(3): 333-338.
- [14] SEIDE K, FASCHINGBAUER M, WENZL M E, et al. A hexapod robot external fixator for computer assisted fracture reduction and deformity correction[J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2004, 1(1): 64-69.
- [15] DAGNINO G, GEORGILAS I, KHLER P, et al. Navigation system for robot-assisted intra-articular lower-limb fracture surgery[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2016, 11(10): 1831-1843.
- [16] 林威, 江五讲. 工业机器人笛卡尔空间轨迹规划[J]. *机械工程与自动化*, 2014(5): 141-143.
- LIN Wei, JIANG Wujiang. Trajectory planning of industrial robot in cartesian space[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2014(5): 141-143.
- [17] 史刚, 张肖在, 祁富贵, 等. 长骨骨干骨折复位机器人研究现状与展望[J]. *医疗卫生装备*, 2019, 40(1): 93-99.
- SHI Gang, ZHANG Xiaozai, QI Fugui, et al. Review of relative researches on long-bone shaft fracture reduction robot[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2019, 40(1): 93-99.
- [18] TANG P F, HU L, DU H L, et al. Novel 3D hexapod computer-assisted orthopaedicsurgery system for closed diaphyseal fracture reduction[J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2012, 8(1): 17-24.
- [19] 史刚, 朱世磊, 张自启, 等. 股骨干骨折复位机器人主从控制系统的设计[J]. *中国医疗设备*, 2018, 33(7): 17-21.
- SHI Gang, ZHU Shilei, ZHANG Ziqi, et al. Design of master-slave control system for femoral shaft fracture reduction robot[J]. *China Medical Devices*, 2018, 33(7): 17-21.
- [20] PALEY D. Problems, obstacles, and complications of limb lengthening by the Ilizarov technique[J]. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, 1990, 250: 81.
- [21] 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 Ziqiang, WANG Tianmiao, LIU Da. Survey on medical robotics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(13): 45-52.
- [22] 夏和桃, 张晓林. 组合式外固定器的研制与临床应用[J]. *中华创伤杂志*, 1992(5): 263-265, 318.
- XIA Hetao, ZHANG Xiaolin. Study, manufacture and clinical application of combined external fixer[J]. *Chinese Journal of Traumatology*, 1992(5): 263-265, 318.
- [23] ZUO Shiping, DONG Mingjie, LI Jianfeng, et al. Configuration design and correction ability evaluation of a novel external fixator for foot and ankle deformity treated by U osteotomy[J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2020, 58(3): 541-558.
- [24] 韩洪志. 骨外固定矫形支架系统研究与开发[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- HAN Hongzhi. Research and development of bone external fixation system[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2006.
- [25] 邸洁. 基于 OpenGL 的泰勒骨外固定器仿真关键技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- DI Jie. Researches on key technologies of simulation of Taylor external fixator based on OpenGL[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [26] 李黎, 尚俊云, 冯艳丽, 等. 关节型工业机器人轨迹规划研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(5): 36-50.
- LI Li, SHANG Junyun, FENG Yanli, et al. Research of trajectory planning for articulated industrial robot[J]. *Computer Engineering and Application*, 2018, 54(5): 36-50.
- [27] HU Lei, ZHANG Jie, LI Changsheng, et al. A femur fracture reduction method based on anatomy of the contralateral side[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2013, 43(7): 840-846.
- [28] GUSTAFSSON A, TOGNINI M, BENGTSSON F, et al.

- Subject-specific FE models of the human femur predict fracture path and bone strength under single-leg-stance loading[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2021, 113: 104-118.
- [29] 朱庆. 柔性驱动股骨干骨折复位机器人系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- ZHU Qing. Research on robotic-assisted femoral shaft fracture reduction system based on compliant actuator[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [30] 桑圣楠, 刘文勇, 侯晓龙, 等. 机器人辅助骨矫形路径的渐进式规划方法[J]. *机械设计*, 2018, 35(S1): 15-18.
- SANG Shengnan, LIU Wenyong, HOU Xiaolong, et al. Progressive path planning for robot assisted orthopaedic deformity correction[J]. *Journal of Machine Design*, 2018, 35(S1): 15-18.
- [31] KIM Y H, INOUE N, CHAO E Y. Kinematic simulation of fracture reduction and bone deformity correction under unilateral external fixation[J]. *Journal of Biomechanics*, 2002, 35(8): 1047-1058.
- [32] LI Changsheng, WANG Tianmiao, HU Lei, et al. A visual servo-based teleoperation robot system for closed diaphyseal fracture reduction[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H. Journal of Engineering in Medicine*, 2015, 229(9): 629-637.
- [33] 徐晓强, 秦品乐, 曾建朝. 基于改进粒子群优化算法的牙齿正畸路径规划方法[J]. *计算机应用*, 2020, 40(7): 1938-1943.
- XU Xiaoqiang, QIN Pinle, ZENG Jianchao. Orthodontic path planning based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(7): 1938-1943.
- [34] 孙昊, 张习帅, 陈建文, 等. 基于蚁群算法的骨外固定器处方优化[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(10): 232-240.
- SUN Hao, ZHANG Xishuai, CHEN Jianwen, et al. Optimization of electronic prescription for parallel external fixator based on ant colony algorithm[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(10): 232-240.
- [35] 雷静桃, 王洋, 程利亚, 等. 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[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(1): 9-19.
- LEI Jingtao, WANG Yang, CHENG Liya, et al. Safety strategy of fracture reduction robot based on the envelope error of reduction path and improved artificial force field method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(1): 9-19.
- [36] 石开铭. 基于有限变形理论的套管柔性针运动建模及路径规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- SHI Kaiming. Motion modeling and path planning of cannula flexible needle based on finite deformation theory[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [37] 赵弥毫. 穿戴式辅助接骨并联机器人系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- ZHAO Mihao. Research on wearable parallel robot system for bone-setting surgery[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [38] 郭悦, 董鑫宇, 苏秀云, 等. 六自由度并联机器人模拟中医正骨手法复位简单骨折的可行性研究[J]. *中医正骨*, 2020, 32(7): 1-5.
- GUO Yue, DONG Xinyu, SU Xiuyun, et al. A feasibility study of simulated TCM bone-setting manipulative reduction using 6-degree of freedom parallel robot for treatment of simple fractures[J]. *The Journal of Traditional Chinese Orthopedics and Traumatology*, 2020, 32(7): 1-5.
- [39] 周文迪. 上肢康复训练机器人路径规划与控制[D]. 长春: 长春大学, 2020.
- ZHOU Wendi. Path planning and control of upper limb rehabilitation training robot[D]. Changchun: Changchun University, 2020.
- [40] DAVID G, JOSHUE R, VICENTE M, et al. A review of motion planning techniques for automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(4): 1135-1145.
- [41] JOHN G, ALBERTO O, ERNESTO S. Energy-optimal trajectory planning for robot manipulators with holonomic constraints[J]. *Systems & Control Letters*, 2011, 61(2): 279-291.
- [42] ZHAO Tao, ZI Bin, QIAN Sen, et al. Algebraic method-based point-to-point trajectory planning of an under-constrained cable-suspended parallel robot with variable angle and height cable mast[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33(4): 53-70.
- [43] YANG Xue, WANG Hongbo, SUN Li, et al. Operation and force analysis of the guide wire in a minimally invasive vascular interventional surgery robot system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 28(2): 249-257.
- [44] JAHANPOUR J, MOTALLEBI M, PORGHOVEH M. A novel trajectory planning scheme for parallel machining robots enhanced with NURBS curves[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2016, 82(2): 257-275.

- [45] 毛若愚. 六轴串联机器人控制系统的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- MAO Ruoyu. Research and application of six-axis serial robot control system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [46] 丁阳, 顾寄南. 基于 QPSO 算法的机器人时间最优轨迹规划[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(1): 16-19.
- DING Yang, GU Jinan. Time-optimal trajectory planning of robot based on QPSO[J]. Automation & Instrumentation, 2020(1): 16-19.
- [47] MARTIN B J. Minimum-effort motions for open-chain manipulators with task-dependent end-effector constraints[J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(2): 213-224.
- [48] LIN H. A Fast and unified method to find a minimum-jerk robot joint trajectory using particle swarm optimization[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 75(3-4): 379-392.
- [49] 孙志毅, 张韵悦, 李虹, 等. 挖掘机的最优时间轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 166-174.
- SUN Zhiyi, ZHANG Yunyue, LI Hong, et al. Time optimal trajectory planning of excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 166-174.
- [50] WANG Xiaobang, SUN Wei, LI Eryang, et al. Energy-minimum optimization of the intelligent excavating process for large cable shovel through trajectory planning[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(5): 2219-2237.
- [51] VASS G, LANTOS B, PAYANDEH S. Real-time optimized robot trajectory planning with jerk[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2003, 36(17): 265-271.
- [52] 浦玉学, 舒鹏飞, 蒋祺, 等. 工业机器人时间-能量最优轨迹规划[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(22): 86-90, 151.
- PU Yuxue, SHU Pengfei, JIANG Qi, et al. Time-energy optimum trajectory planning for industrial robot[J]. Computer Applications and Software, 2019, 55(22): 86-90, 151.
- [53] GASPARETTO A, LANZUTTI A, VIDONI R, et al. Experimental validation and comparative analysis of optimal time-jerk algorithms for trajectory planning[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2011, 28(2): 164-181.
- [54] 杜海龙. 基于 Stewart 平台的并联骨折智能复位系统的研发及应用[D]. 北京: 中国人民解放军军医进修学院, 2011.
- DU Hailong. Development and application of the parallel intelligent reduction system of fractures on the basis of Stewart platform[D]. Beijing: Chinese PLA General Hospital & Postgraduate Medical School, 2011.
- [55] 马宇豪, 梁雁冰. 一种基于六次多项式轨迹规划的机械臂避障算法[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(2): 392-400.
- MA Yuhao, LIANG Yanbing. An obstacle avoidance algorithm for manipulators based on six-order polynomial trajectory planning[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(2): 392-400.
- [56] 曾德全, 余卓平, 张培志, 等. 三次 B 样条曲线的无人车避障轨迹规划[J]. 同济大学学报, 2019, 47(S1): 159-163.
- ZENG Dequan, YU Zhuoping, ZHANG Peizhi, et al. Cubic B-spline curve for obstacle avoidance trajectory planning of unmanned vehicle[J]. Journal of Tongji University, 2019, 47(S1): 159-163.
- [57] CHWA D, KANG J, CHOI J Y. Online trajectory planning of robot arms for interception of fast maneuvering object under torque and velocity constraints[J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part A, 2005, 35(6): 831-843.
- [58] 陈瑛. 航天器交会与接近操作采样运动规划与控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- CHEN Ying. RRT-based trajectory planning and control for spacecraft autonomous rendezvous and proximity operations[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [59] 陈杰, 毛范海. 少自由度串联机器人的误差分析和补偿方法[J]. 现代机械, 2020(5): 30-34.
- CHEN Jie, MAO Fanhai. Error analysis and compensation method for low-degree-of-freedom series robots[J]. Modern Machinery, 2020(5): 30-34.
- [60] 姚立纲, 廖志炜, 卢宗兴, 等. 踝关节章动式康复运动轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 33-40.
- YAO Ligang, LIAO Zhiwei, LU Zongxing, et al. Nutation motion based on trajectory planning for a novel hybrid ankle rehabilitation device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 33-40.
- [61] 柯振辉, 朱华炳, 何双华. 六自由度串联机器人轨迹误差分析与实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(10): 64-67, 72.
- KE Zhenhui, ZHU Huabing, HE Shuanghua. Error analysis and experimental study of 6-DOF serial robot[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing

- Technique, 2018(10): 64-67, 72.
- [62] 高涵, 张明路, 张小俊. 冗余机械臂空间轨迹规划综述[J]. 机械传动, 2016, 40(10): 176-180.
- GAO Han, ZHANG Minglu, ZHANG Xiaojun. A review of the space trajectory planning of redundant manipulator[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(10): 176-180.
- [63] 彭斯洋. 4-RUP_aR 并联机器人尺度优化设计及轨迹规划[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
- PENG Siyang. Scale optimization design and trajectory planning of 4-RUP_aR parallel robot[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018.
- [64] 刘文彩, 许勇, 陈佳丽, 等. 6-SPU 并联机器人的轨迹规划与仿真[J]. 机械传动, 2019, 43(6): 75-82.
- LIU Wencai, XU Yong, CHEN Jiali, et al. Trajectory planning and simulation of 6-SPU parallel robot[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(6): 75-82.
- [65] LI Jianfeng, LI Guotong, DONG Mingjie, et al. Comparison of three different correction trajectories for foot and ankle deformity treated by supramalleolar osteotomy using a novel external fixator[J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2020, 36(12): 1-21.
- [66] 张金明, 陈永秋. 基于遗传算法的机器人轨迹插值方法的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(5): 48-51.
- ZHANG Jinming, CHEN Yongqiu. Research on robot trajectory interpolation method based on genetic algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(5): 48-51.
- [67] 孙亮, 马江, 阮晓钢. 六自由度机械臂轨迹规划与仿真研究[J]. 控制工程, 2010, 17(3): 388-392.
- SUN Liang, MA Jiang, RUAN Xiaogang. Trajectory planning and simulation of 6-DOF manipulator[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(3): 388-392.
- [68] 董甲甲, 王太勇, 董靖川, 等. 改进 B 样条曲线应用于 6R 机器人轨迹优化[J]. 中国机械工程, 2018, 29(2): 193-200.
- DONG Jiajia, WANG Taiyong, DONG Jingchuan, et al. Applications of improved B-spline curves to 6R robot trajectory optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(2): 193-200.
- [69] 刘献礼, 周肖阳, 李茂月, 等. NURBS 曲线 S 形加减速寻回实时插补算法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 183-192.
- LIU Xianli, ZHOU Xiaoyang, LI Maoyue, et al. The real-time algorithm of NURBS curve retriever interpolation with S-type acceleration and deceleration control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 183-192.
- [70] 张三元, 蒋方炎. 空间曲线的圆弧样条插值[J]. 中国图象图形学报, 1999(8): 84-88.
- ZHANG Sanyuan, JIANG Fangyan. Interpolating space curve with circular arc spline[J]. Journal of Image and Graphics, 1999(8): 84-88.
- [71] ELIEL B D, MORAN S, IDO R, et al. Evaluation of a CT-guided robotic system for precise percutaneous needle insertion[J]. Journal of Vascular and Interventional Radiology, 2018, 29(10): 1440-1446.
- [72] 舒鹏飞. 六轴工业机器人的轨迹优化研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- SHU Pengfei. Research on trajectory optimization of 6-DOF industrial robots[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [73] RUIHUA YE, YONGHUA CHEN. Path planning for robot assisted femur shaft fracture reduction: A preliminary investigation[C]// IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, 11-13 May, 2009, Hong Kong, China. IEEE, 2009: 113-117.
- [74] 李孟歆, 李冲. 基于 3TPS/TP 型并联机器人的轨迹规划算法[J]. 电子技术与软件工程, 2014(23): 111.
- LI Mengxin, LI Chong. Trajectory planning algorithm based on 3TPS/TP parallel robots[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2014(23): 111.
- [75] WANG P, YANG H, XUE K. Jerk-optimal trajectory planning for Stewart platform in joint space[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2-5 August, 2015, Beijing, China. IEEE, 2015: 1932-1937.
- [76] GUO Yue, ZHANG Lu, WEI Mengting, et al. The study of multifunction external fixator based on Stewart platform[C]//MATEC Web of Conferences, 2015, 31: 1-4.
- [77] 张伟. 仿生青蛙机器人及其游动轨迹规划的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- ZHANG Wei. Research on the frog inspired robot and its swimming trajectory planning[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [78] 郭娟. 基于粒子群算法的双臂机器人运动轨迹优化研究[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(4): 324-329.
- GUO Juan. Research on trajectory optimization of dual-arm robot based on particle swarm optimization[J].

- Chinese Journal of Construction Machinery, 2020, 18(4): 324-329.
- [79] 张玲, 崔建涛, 孙海燕, 等. 轮式移动机器人机械臂最优轨迹控制算法仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(12): 288-291, 295.
- ZHANG Ling, CUI Jiantao, SUN Haiyan, et al. Simulation of optimal trajectory control algorithm for wheeled mobile robot manipulator[J]. Computer Simulation, 2019, 36(12): 288-291, 295.
- [80] KODAGODA S, SEHESTEDT S, DISSANAYAKE G. Socially aware path planning for mobile robots[J]. Robotica, 2014, 34(3): 513-526.
- [81] TANG Bijun, HIROTA K, WU Xiangdong, et al. Path planning based on improved hybrid A* algorithm[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2021, 25(1): 64-72.
- [82] BUSCHBAUM J, FREMD R, POHLEMAN T, et al. Introduction of a computer-based method for automated planning of reduction paths under consideration of simulated muscular forces[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2017, 12(8): 1369-1381.
- [83] 陈劲峰, 黄卫华, 章政, 等. 动态环境下基于改进人工势场法的路径规划算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(12): 6-9, 14.
- CHEN Jinfeng, HUANG Weihua, ZHANG Zheng, et al. Path planning algorithm based on improved artificial potential field method in dynamic environment[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(12): 6-9, 14.
- [84] 马小陆, 梅宏. 基于改进势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 19-27.
- MA Xiaolu, MEI Hong. Ant colony optimization with improved potential field heuristic for robot path planning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 19-27.
- [85] 刘密, 刘检华, 何永熹, 等. 复杂结构条件下的装配路径求解与优化技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 97-105.
- LIU Mi, LIU Jianhua, HE Yongxi, et al. Research on assembly path planning and optimization of complex structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9): 97-105.
- [86] 张伟民, 付仕雄. 基于改进 RRT* 算法的移动机器人路径规划[J]. 华中科技大学学报, 2021, 49(1): 31-36.
- ZHANG Weimin, FU Shixiong. Mobile robot path planning based on improved RRT* algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2021, 49(1): 31-36.
- [87] ALLEN R E, PAVONE M. A real-time framework for kinodynamic planning in dynamic environments with application to quadrotor obstacle avoidance[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 115: 174-193.
- [88] 王毅然, 经小川, 田涛, 等. 基于强化学习的多 Agent 路径规划方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(8): 165-171.
- WANG Yiran, JING Xiaochuan, TIAN Tao, et al. Multi-Agent path planning based on reinforcement learning[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(8): 165-171.
- [89] 任艳青, 方灶军, 徐德, 等. 基于模糊神经网络的乒乓球旋转飞行轨迹模式分类[J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 263-269.
- REN Yanqing, FANG Zaojun, XU De, et al. Spinning pattern classification of table tennis ball's flying trajectory based on fuzzy neural network[J]. Control and Decision, 2014, 29(2): 263-269.
- [90] 朴松昊, 洪炳熔. 一种动态环境下移动机器人的路径规划方法[J]. 机器人, 2003(1): 18-21, 43.
- PIAO Songhao, HONG Bingrong. A path planning approach to mobile robot under dynamic environment[J]. Robot, 2003(1): 18-21, 43.
- [91] 茹琦. 结合先验知识的深度 Q 神经网络算法在室内路径规划中的研究与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- RU Qi. Research and application of deep Q neural network algorithm combined with prior knowledge in indoor path planning[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [92] 朱斐, 吴文, 伏玉琛, 等. 基于双深度网络的安全深度强化学习方法[J]. 计算机学报, 2019, 42(8): 1812-1826.
- ZHU Fei, WU Wen, FU Yuchen, et al. A dual deep network based secure deep reinforcement learning method[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(8): 1812-1826.
- [93] JOUNG S, LIAO H, KOBAYASHI E, et al. Hazard analysis of fracture-reduction robot and its application to safety design of fracture-reduction assisting robotic system[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3-7 May, 2010, Anchorage, Alaska, USA. IEEE, 2010: 1554-1561.
- [94] FU Zhuoxin, SUN Hao, DONG Xinyu, et al. Indirect visual guided fracture reduction robot based on external

- markers[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2020, 17(1): 1-11.
- [95] BUSCHBAUM J, FREMD R, POHLEMAN T, et al. Computer-assisted fracture reduction: A new approach for repositioning femoral fractures and planning reduction paths[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2015, 10(2): 149-159.
- [96] LI Changsheng, WANG Tianmiao, HU Lei, et al. Accuracy analysis of a robot system for closed diaphyseal fracture reduction[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11: 1-11.
- [97] WESTPHAL R, WINKELBACH S, WAHL F, et al. Robot-assisted long bone fracture reduction[J]. International Journal of Robotics Research, 2009, 28(10): 1259-1278.
- [98] 王军强, 胡磊, 苏永刚, 等. 下肢骨折牵引复位器的设计和临床初步应用[J]. 中华外科杂志, 2010, 48(18): 1425-1429.
- WANG Junqiang, HU Lei, SU Yonggang, et al. Primary clinical application of traction reductor for lower limb fracture[J]. Chinese Journal of Surgery, 2010, 48(18): 1425-1429.
- [99] THOMAS G, ROLF W, JENS F, et al. Forces and torques during fracture reduction: Intraoperative measurements in the femur[J]. Journal of Orthopaedic Research, 2006, 24(3): 333-338.
- [100] LI Changsheng, WANG Tianmiao, HU Lei, et al. Robot-musculoskeletal dynamic biomechanical model in robot-assisted diaphyseal fracture reduction[J]. Bio-Medical Materials and Engineering, 2015, 26(s1): S365-S374.
- [101] KIM W Y, KO S Y, PARK J, et al. 6-DOF force feedback control of robot-assisted bone fracture reduction system using double F/T sensors and adjustable admittances to protect bones against damage[J]. Mechatronics: The Science of Intelligent Machines, 2016, 35: 136-147.
- [102] ZHANG Xishuai, SUN Hao, CHEN Jianwen, et al. Optimization of electronic prescription for parallel external fixator based on genetic algorithm[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2019, 14(5): 861-871.
- [103] MOHAMMADI H, YAO Hong, KHADEMI G, et al. Extended kalman filtering for state estimation of a hill muscle model[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(3): 384-394.
- [104] ZUK M, SYCZEWSKA M, PEZOWICZ C. Use of the surface electromyography for a quantitative trend validation of estimated muscle forces[J]. Biocybernetics and Biomedical Engineering, 2018, 38(2): 243-250.
- [105] CHEN Yupei, LAN Yishan, HU Wenlong, et al. Nonoperative manipulative reduction with chinese herbs for the treatment of a displaced olecranon fracture: A case report[J]. Medicine, 2018, 97(21): e10818.
- [106] 龙明星. 多功能骨科机器人概念样机的搭建及长骨折复位系统的研究与测试[D]. 天津: 天津医科大学, 2019.
- LONG Duoxing. Development of a multifunctional orthopaedic robotic system and validation for its application in long bone fracture reduction[D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2019.
- [107] NEEDLEMAN R L. Accurate reduction of an ankle syndesmosis with the "glide path" technique[J]. Foot and Ankle International, 2013, 34(9): 1308-1311.
- [108] DIRHOLD B M, CITAK M, Al-KHATEEB H, et al. Current state of computer-assisted trauma surgery[J]. Current Reviews in Musculoskeletal Medicine, 2012, 5(3): 184-191.
- [109] 陈秋莲, 蒋环宇, 郑以君. 机器人路径规划的快速扩展随机树算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(16): 10-17.
- CHEN Qiulian, JIANG Huanyu, ZHENG Yijun. Summary of rapidly-exploring random tree algorithm in robot path planning[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(16): 10-17.
- [110] 王小明, 宋吉, 郑继新, 等. 改进 B 样条曲线的机器人轨迹拟合研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(2): 41-43.
- WANG Xiaoming, SONG Ji, ZHENG Jixin, et al. Research on robot trajectory fitting based on improved B-spline curve[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(2): 41-43.
- [111] FANG Yi, HU Jie, LIU Wenhai, et al. Smooth and time-optimal s-curve trajectory planning for automated robots and machines[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 137: 127-153.
- [112] UNSAL D, MEHMET C. Improved trajectory planning of an industrial parallel mechanism by a composite polynomial consisting of Bézier curves and cubic polynomials[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 132: 248-263.

- [113] 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 Murong, LEI Yong, HUANG Cheng, et al. Flexible needle path planning based on the iterative learning algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(11): 128-137.
- [114] DU H L, HU L, LI C S, et al. Preoperative trajectory planning for closed reduction of long-bone diaphyseal fracture using a computer-assisted reduction system[J]. The International Journal of Medical Robotics and

Computer Assisted Surgery, 2015, 11(1): 58-66.

作者简介: 崔睿, 男, 1997 年出生。主要研究方向为机器人轨迹规划。

E-mail: cryx0304@163.com

李剑(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 特聘研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为医疗康复机器人、智能养老机器人、医用 3D 打印、智能康复辅助器具等。

E-mail: jianli_628@126.com

孙昊, 男, 1979 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为医用服务机器人、智能化医疗器械等。

E-mail: sunhao@hebut.edu.cn