

面向质子重离子精准治疗癌症的智能机器人系统

于洪金¹, 孟庆站², 胡岩¹, 刘众望¹, 卓雪芹¹

1. 山东省智能机器人应用技术研究院 山东济宁 273500

2. 济宁技师学院 山东济宁 272100

摘要：面向质子重离子精准治疗设备进行系统研究，研发六轴智能机器人系统，在影像环境下，借助于先进的远程离线操控通信、三维激光扫描计算、4D视觉智能扫描追踪、力传感前馈控制及三维仿真数据等高精度海量信息算法技术，实现肿瘤放射治疗和定向爆破。

关键词：智能医疗机器人；质子重离子治疗技术；脑机交互；环境感知；识别算法



高级工程师 于洪金

1 序言

质子重离子治疗技术是国际公认的放疗尖端技术和未来趋势。质子重离子同属于粒子线，与传统的光子线不同，粒子线可以形成能量布拉格峰，能够对肿瘤细胞进行立体定向爆破，而对正常组织没有明显的破坏作用，可实现疗效的最大化。

目前，德国LEONI掌握质子重离子机器人治疗床技术和成熟产品，但设备价格较高，因此研制面向我国患者特质、智慧医疗一体化及价格更低廉的质子重离子机器人，并进行产品国产化，是非常有必要的。中国科学院近代物理研究所正在研发世界上最大型的质子重离子癌细胞放疗设备，融合了加速器、核探测和医学诊疗等相关技术，提供碳离子

束用于癌症的治疗，治疗终端主要为水平/垂直终端或机器人治疗床，主要作用是承载肿瘤患者进行定位治疗。

本文针对上述问题，在影像环境下，借助于先进的远程离线操控通信、三维激光扫描计算、4D视觉智能扫描追踪、力传感前馈控制及三维仿真数据高精度海量信息算法等技术，研究质子重离子放射治疗六轴机器人系统，协助重离子加速器精准定位肿瘤，力争为国产质子重离子癌细胞放疗提供高精度的末端机器人。

2 六轴机器人的构成

图1所示为质子重离子癌症治疗六轴机器人技术路线。该六轴机器人主要包括硬件、软件和人工智能3部分。硬件主要包括医疗机器人机构、驱动部件、传动部件、外壳、安全传感装置和末端执行器等。软件主要有纳博特控制系统、硬件构型算法设计、路径规划、轨迹规划、力矩前馈、OPC UA通信、Lua函数、安全区设计、UI界面、医疗数据搭建和智能通信系统等。人工智能主要有激光扫描仪智能识别算法、采集技术、数据分析、数据应用和动力学仿真等技术。该机器人的主要功能是在影像环境下，协助重离子加速器精准定位癌症患者身体肿瘤位置，然后由重离子加速器对肿瘤部位进行放疗。

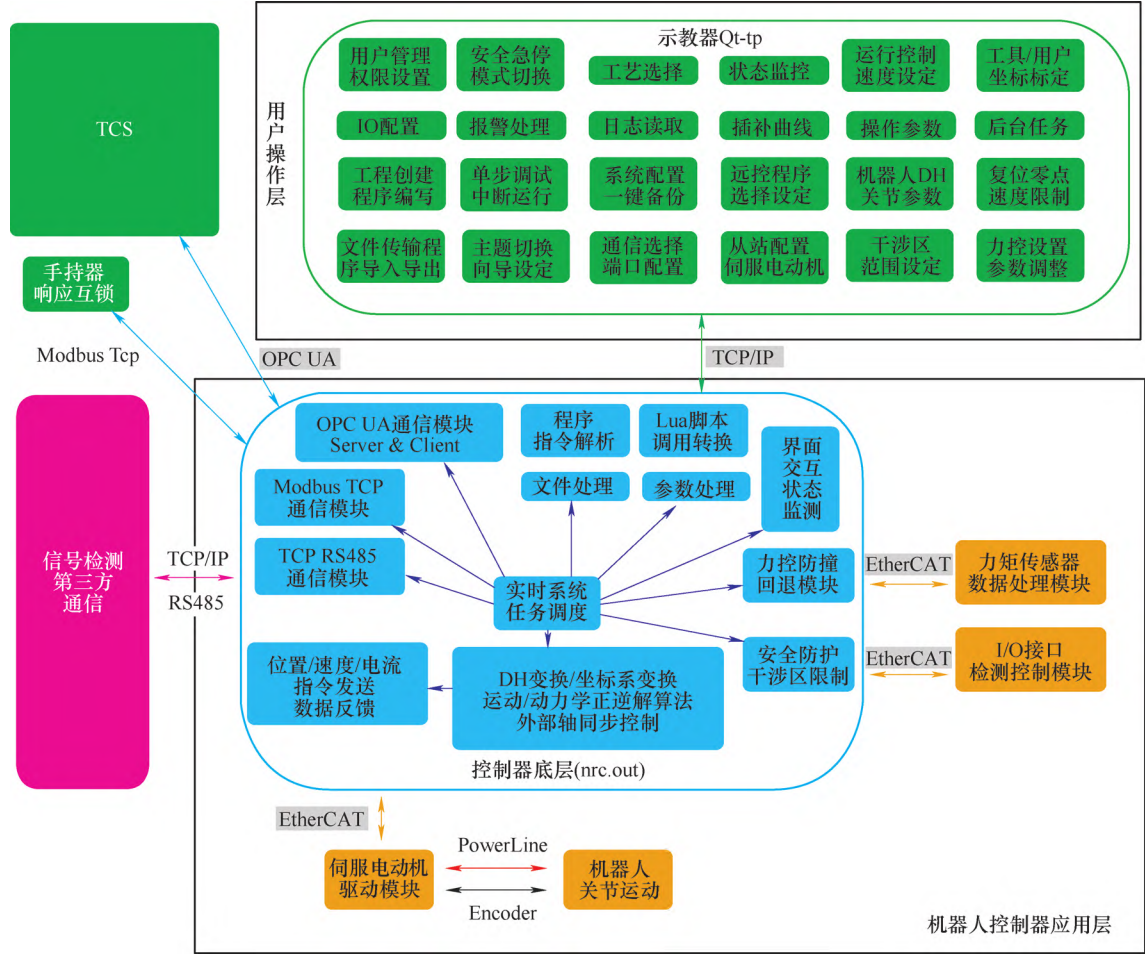


图1 技术路线

图2所示机器人治疗床是质子治疗的关键设备，是治疗患者的必要载体，目前的机器人大多依赖进口，或者局部结构依赖进口，价格昂贵，整体一致性差，不能根据医疗需要进行有效定制。本文介绍的机器人治疗床是目前自主研发设计制造的质子治疗辅助设备，运动半径为3120mm，末端负载达400kg，重复定位精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，本体总质量约2500kg。控制功能自主研发定制，专门应用于医疗行业。

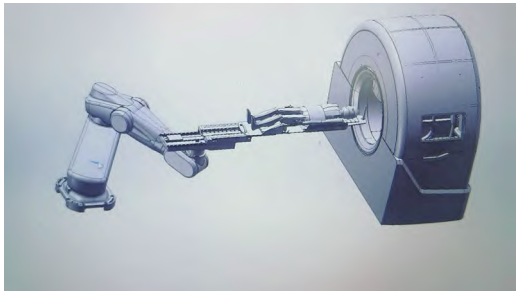


图2 机器人治疗床

2.1 硬件部分

硬件主要指智能机器人治疗床，包含机器人本体、EMC控制柜、示教器、力矩传感器和激光扫描仪等。机器人各项技术指标见表1。

表1 机器人技术指标

序号	性能指标	数值
1	负载/kg	≥ 400
2	臂展/mm	3000
3	重复定位精度/mm	± 0.1
4	姿态精度/ $^{\circ}$	± 0.1
5	安全防护/级	5
6	直线运动位移/mm	10
7	旋转运动位移/ $^{\circ}$	5

该机器人负载大、定位精度高，具有过冲限制、速度控制、碰撞检测、机器人安全空间及监测监控5级安全防护。图3所示为医疗机器人本体结

构，进行了强度校核有限元分析及动力学性能仿真分析研究，确保机器人强度满足设计要求，动力学性能满足机器人运动要求，具有高速的采样率和灵活的滤波功能，可实现更快的响应，确保设备精度。高级自整定可最大限度地减小位置误差并将定位时间缩短至0。全面的自整定功能结合工程经验和专业知识，可优化配置以实现与其他机器人不同的性能，创新抑振控制算法可消除机械共振，非线性算法可有效防止柔性系统振动。

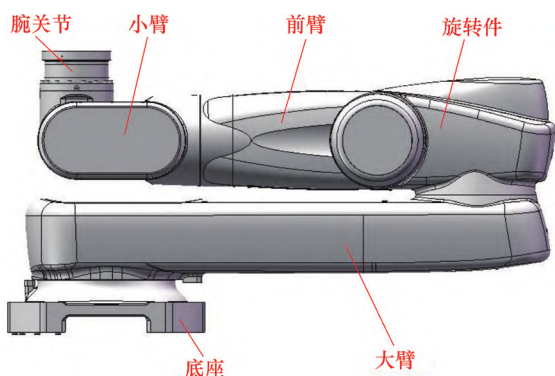


图3 医疗机器人本体结构示意图

2.2 软件部分

软件系统提供了完全开放的基本医学诊疗指令文件库，用户可以按照自己的实际需求自行定义添加设置医疗方式，添加的任何指令都能输出到机器

人医疗知识库数据里面，生成轨迹方式多样，支持多种机器人、外部轴及机器人的整个生命周期，使用图形化编程、编辑和调试机器人系统来创建机器人的运动轨迹、诊断方式，并模拟优化现有的机器人程序，只需设定时间段，即可查询患者在此时间段内的病情状态、就诊信息和诊断提示，系统同样给出每个标点的患者姓名、定位时间及当时病情的基本描述，大幅降低系统布线与维护成本，可扩展性极佳，支持多台机器人协作，能同时完成4台机器人的协作控制^{[1]、[2]}。软件架构如图4所示，其特点为：①跨平台，底层使用C++，界面使用Qt，可移植到各种兼容设备。②平台采用统一接口API，图像处理算子、通信各模块采用DLL调用，用户可随意扩展。③采用拖拽式编程，以满足普通用户简单项目使用，同时提供Lua脚本编程，满足高级用户实现复杂功能。④集成常用的工业通信协议OPC UA、Modbus RTU、Modbus TCP/IP和Ethernet Socket等，可以无缝连接工厂其他PLC/Robot设备。工业视觉核心软件系统的通用化，可以帮助提高解决用户复杂问题的能力，在行业内甚至跨行业进行解决方案的迁移与复制，大大缩短部署周期，节省人力物力投入。本软件采用模块化设计，各模块功能明确，入口参数完整，编写规范，各模块之间逻



图4 软件架构

辑关系清晰，返回参数严谨。

2.3 人工智能部分

机器人人工智能部分由智能传感器、智能扫描仪、智能追踪系统和4D视觉系统集成，负责采集治疗床、人员运动及辅助设备的轨迹数据。人工智能应用模块如图5所示，具体包括：①图像获取模块，用以获取患者运动的图像信息。②预处理模块，用以根据图像信息构建平面直角坐标系，以得到图像信息的像素点坐标，还用以根据图像信息的各像素点灰度值对图像信息进行二值化处理。③坐标提取模块，用于对预处理后的图像信息进行分析，以提取采样点信息。图像分析单元用以根据预处理后的图像信息的像素点灰度值，对点图坐标和线图坐标进行分析。④坐标分析模块，用以根据采样点信息对采样点关联性进行分析。所述坐标分析模块设有端点分析单元，用以根据线图坐标对端点坐标和连续线图坐标进行分析。所述坐标分析模块还设有关联性分析单元，用以根据线图坐标对端点坐标关联性进行分析。所述关联性分析单元还用以根据端点坐标和点图坐标对点图坐标关联性进行分析。所述坐标分析模块还设有关联性调整单元，用以通过端点坐标关联性对点图坐标关联性的分析过程进行调整。所述坐标分析模块还设有关联性迭代单元，用以根据无关联的点图坐标数量对点图坐标关联性的分析过程进行关联性迭代。所述关联性迭代单元还用以根据关联性迭代次数对点图坐标关联性分析过程的调整过程进行优化。⑤轨迹分析模块，用以根



图5 人工智能应用模块

据采样点关联性对打磨轨迹进行分析。⑥输出模块，用以对工作轨迹进行输出。⑦分析校正模块，用以获取根据患者的动作运动的样品图像，并根据样品图像对提取采样点信息和采样点关联性的分析过程进行校正。

3 技术可行性

根据质子治疗的应用环境，机器人关节的自由度布局形式为：旋转-旋转-摆动-旋转-摆动-旋转。该种形式是传统SCARA机器人和六轴机器人的结合，能获得更大工作空间，并且算法上也能实现运动学的正逆解和轨迹规划。图6为机器人治疗床运动仿真示意，通过简图的推导，能设定治疗床的最低和最高位置，并求得机器人的运动空间。为了保证机器人的精度、减少传动级数以及减少设计和制造误差，所有关节电动机都选用进口品牌，连接采用直连形式。同时在设计过程中，通过有限元和动力学分析，获得机器人刚性状况和电动机驱动力学性能，并从材料选择、加工工艺、装配检测和质量控制等多个方面来保证。在加工方面，采用金属模具、砂型铸造，普通机械加工工件采用高精度机床加工；在材料方面，本体关键承重部件采用QT500球墨铸铁，并进行热处理，以保证强度；装配时采用边装边检测，从零件到组件、从组件到部件的装配方法，进行过程检验、质量控制和过程控制。该机器人具有6个自由度，工作半径3.1m左右，末端承重。末端负载达400kg，其中治疗床本身80kg、可承载患者体重约200kg，偏心500mm。重复定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ，绝对精度 $\pm 0.2\text{mm}$ ，TCP运行最大速度300mm/s。同时满足EMC要求和具有指令运动、力控、间隙补偿、自定义函数和OPC UA通信协议等

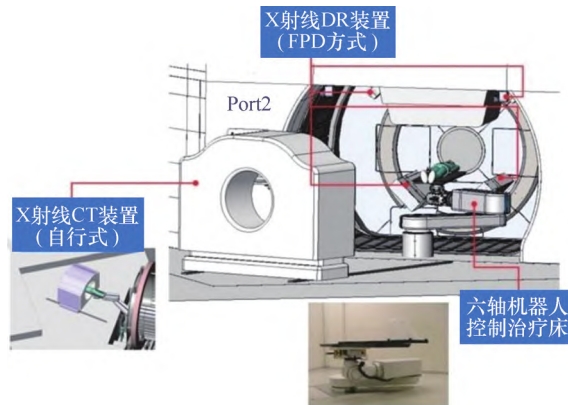


图6 机器人治疗床运动仿真示意

功能要求。通过上述分析可知，定制一款用于质子治疗的机器人是可行的，它结构紧凑，传动链少，内部中空走线，运动精度高，运行安全可靠。

4 试验验证和分析

质子重离子治疗被誉为“肿瘤定向爆破神器”。在同行业类似产品中，KUKA机器人治疗床是在传统工业机器人的基础上，进行了一些调整，外观上加了医用外壳。目前这种方式在国内外应用相对广一些。目前，根据实际应用场景进行重新设计，开发一款针对质子治疗的机器人是形势所驱^[3, 4]，也能更好地适应现实治疗环境，更能体现医疗专用性。图7所示为肝癌质子治疗疗效。

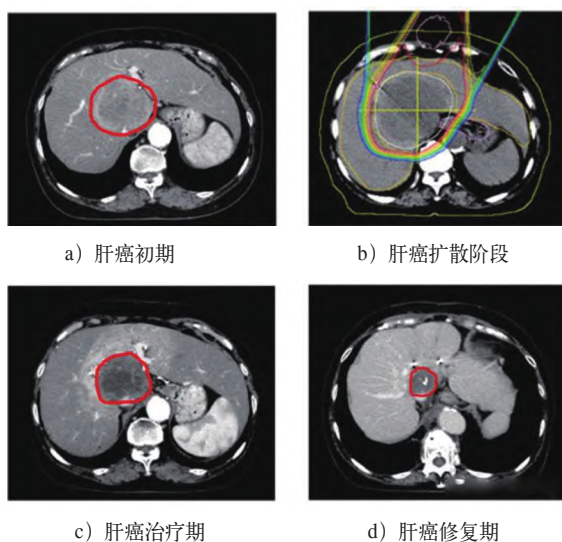


图7 肝癌质子治疗疗效

利用机器人进行了100例的模型和动物试验，获得了大量试验数据（见表2）。

表2 试验数据

序号	性能指标		数值
1	工作半径/mm		3120
2	质子放射的能量/MeV		70~230
3	roll（翻滚角）与pitch（俯仰角）旋转时，法兰中心旋转精度/（°）		±0.1
4	噪声/dB		≤60
5	紧急中断运动时	旋转最大偏差/（°）	5
		直线最大偏差/mm	10.0
6	恶性肿瘤的整体缓解率（%）		60

5 结束语

2014年，我国部分中心城市的三甲医院开始引

入外科手术机器人，整体而言，医疗机器人在我国医疗领域的应用还处于导入阶段，无论是机器人本身的技术，还是医护人员的操作能力，都需要一个培育的过程。目前质子重离子是最先进的肿瘤放疗治疗方式，是新型的不需开刀的治疗肿瘤的方式之一。

本文所述治疗用机器人，在系统方面开发了运动学和力控算法，定制开发了各种通信接口，保证数据传送的无障碍性，具备防碰撞、拖拽功能及系统报警功能，具备系统适配、程序移植、去皮使能、触发回退、界面同步及安全区设置等力控性能。可做到高精度速度规划、路径规划，全局智能路径优化，具有多种加减速策略控制与平滑功能。二次开发接口、动态库嵌入，可加载客户自定义模块，支持OPC UA Server等各种通信协议，使机器人在医学方面可促进药剂量分布合理，质子具有布拉格峰（Bragg Peak）的物理特性，使峰值部位对准肿瘤病灶处，精准度高。除了定向爆破、治疗精准外，质子治疗还具有诸多优势：①能减轻对容易受放射线影响的器官的副作用，身体负担小，老年患者或体质虚弱的患者也能接受治疗。②能降低儿童和年轻患者放疗后第二原发癌的发生率。③因有并发症而无法手术治疗的患者，也能接受质子线治疗，不需要住院，到医院门诊治疗即可。④照射中不会感到疼痛等不适，治疗后不太会妨碍恢复正常社会生活和日常生活，能维持良好的生活质量。

目前，国内仅有一些城市配备数台质子重离子机器人治疗床。作为最先进的肿瘤放疗治疗设备，质子重离子机器人治疗床需求广阔，具有较高的社会价值、应用价值和市场价值。待其国产化技术成熟以后，预计售价和单次手术费用将大大降低。

参考文献：

- [1] 冯涛. 医疗机器人系统标定实验与精度分析[D]. 北京：清华大学，2009.
- [2] 刘凤坤. 皮肤病医疗机器人系统设计与实验[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2022.
- [3] 刘少丽，陈恳，吴丹，等. 医疗机器人肿瘤多针穿刺手术规划[J]. 机器人，2013（6）：692-702.
- [4] 杨小龙，陈惠贤，陈继朋，等. 医用质子重离子加速器应用现状及发展趋势[J]. 中国医疗器械杂志，2019（1）：37-42.

MW 20240906