

## 一、项目名称

自主式口腔种植机器人系统的研发与应用

## 二、主要完成人

| 姓名  | 排名 | 行政职务               | 技术职称      | 工作单位          | 完成单位          | 对本项目贡献   |
|-----|----|--------------------|-----------|---------------|---------------|--|
| 白石柱 | 1  | 空军军医大学口腔医院数字化中心主任  | 研究员、副主任医师 | 中国人民解放军空军军医大学 | 中国人民解放军空军军医大学 | 本项目主要执行人，负责全面安排，实施具体研究和推广应用。是主要知识产权1的第二发明人，主要知识产权5、6、10的通讯作者。<br>证明材料：必备附件1-1；其他附件2-2-2、2-2-3、2-2-7。                 |
| 赵钦民 | 2  | 口腔系统重建与再生国家重点实验室主任 | 教授、主任医师   | 中国人民解放军空军军医大学 | 中国人民解放军空军军医大学 | 本项目学术带头人，提出总的学术思想、研究方向、理论体系和推广应用的路线。是主要知识产权1的第一发明人，主要知识产权4、5、6、10的通讯作者。<br>证明材料：必备附件1-1；其他附件2-1-1、2-2-2、2-2-3、2-2-7。 |
| 王君臣 | 3  | 无                  | 副教授       | 北京航空航天大学      | 北京航空航天大学      | 提出口腔种植机器人无标记点实时配准方法以及基于全息投影的增强现实显示技术；提出口腔种植机器人的人机柔顺交互和主动安全约束控制方法。是主要知识产权3、7的第一发明人。<br>证明材料：必备附件1-3；其他附件2-2-4。        |
| 谢瑞  | 4  | 无                  | 副主任医师     | 中国人民解放军空军军医大学 | 中国人民解放军空军军医大学 | 主导完成种植机器人系统体外模型试验，负责临床研究和临床大规模应用。是主要知识产权1的第五发明人，是主要知识产权4的共同第一作者，是主要知   |

|     |   |                   |       |                |                |  |
|-----|---|-------------------|-------|----------------|----------------|--|
|     |   |                   |       |                |                | 识产权 6 的第一作者。<br>证明材料：必备附件 1-1-1；其他附件 2-2-1、2-2-3。  |
| 刘琛  | 5 | 无                 | 主治医师  | 中国人民解放军空军军医大学  | 中国人民解放军空军军医大学  | 参与本项目各部分的实验设计、结果分析和推广应用。是主要知识产权 5、10 的第一作者。<br>证明材料：其他附件 2-2-2、2-2-7。  |
| 王利峰 | 6 | 雅客智慧（北京）科技有限公司董事长 | 高级工程师 | 雅客智慧（北京）科技有限公司 | 雅客智慧（北京）科技有限公司 | 提出口腔种植机器人“主动+被动双操作模式”、“力-视觉融合主动安全控制”、“多源数据单次配准”三大核心技术，是主要知识产权 1 的第三完成人，主要知识产权 2、8、9 的第一完成人。<br>证明材料：必备附件 1-1、1-2，其他附件 2-2-5、2-2-6。 |

### 三、主要完成单位

| 完成单位           | 排名 | 创新推广贡献   |
|----------------|----|--|
| 中国人民解放军空军军医大学  | 1  | <p>学校是本项目的主导研发与主导推广应用单位，为本项目实施各环节提供了坚实的人力、物力和财力保障。第三附属医院、口颌系统重建与再生全国重点实验室、国家口腔疾病临床研究中心为本项目提供了先进的仪器设备和技術支撑、从伦理审查指导和临床资源等方面提供了全方位保证。</p> <p>学校是本项目主要知识产权 1 的最先所有权单位，后将产权转化至第 2 完成单位，是知识产权 4-6，10 的所有权单位。</p> |
| 雅客智慧（北京）科技有限公司 | 2  | <p>公司作为本项目的核心研发与市场推广单位，为项目的技术创新、产品转化及临床应用提供了关键支持；在推动成果转化方面，公司产品率先进入国家药监局创新医疗器械特别审批通道，于 2021 年获得国家三类医疗器械注册证与生产许可证。</p> <p>公司是本项目主要知识产权 1-2, 8-9 的所有权单位。</p>   |
| 北京航空航天大学       | 3  | <p>学校为本项目实施过程中所涉及的工学技术研发和突破提供了坚实的人力、物力和财力保障。与第一完成单位合作开发了第一代口腔种植手术机器人系统，并开展了模型实验、动物实验和志愿者实验，验证了技术</p>   |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  | 路线的可行性，为后续口腔种植手术机器人系统的商业化和产业化奠定了技术基础。<br>学校是本项目主要知识产权 3 和 7 的所有权单位。 |
|--|--|---|

四、提名者

陕西省卫生健康委员会

五、提名意见

本项目成功研制出世界首台自主式口腔种植机器人系统，实现成果转化，产品在临床得到广泛应用，实现了种植手术的精准化、标准化与智能化，标志着我国口腔种植已进入机器人时代，对提升我国口腔医疗水平具有重大意义。

提名该项目为陕西省技术发明奖 一 等奖。

六、项目简介

种植牙是修复缺失牙齿的首选方案，在我国年需求量已超 600 万颗且持续增长。种植体植入位置与精度直接决定手术效果及远期成功率。然而，传统种植手术依赖术者经验，普通医生的操作精准性和稳定性难以保证；高年资种植专家数量极少，医患供需矛盾突出，种植手术效果难以保障。为攻克口腔种植精准化与同质化难题，项目组在国家、军队及陕西省多项科研课题持续支持下，历经十二年攻关，成功研制具有完全自主知识产权的“自主式口腔种植机器人系统”。该成果通过北京雅客智慧有限公司成功产业化，获得了国家食品药品监督管理局三类医疗器械注册证。产品应用于临床后，将牙种植手术假体位置偏差由 2.1 mm 缩小至 0.5 mm 内，角度偏差由 7.3°缩小至 1°以内，是目前精度最高的种植手术方式。目前已在全国 312 家医疗机构开展应用，累计完成手术 10,438 台次，成功植入种植体 16,781 颗。本项目的发明内容如下：

**1.首创口颌系统影像自动建模与智能手术规划方法，研发了机器人的智能规划与设计软件，取得了医疗器械二类注册证，降低手术规划难度，提升术前准备效率。**

针对传统种植手术方案“定不好”的经验依赖问题和组件设计环节多、过程复杂、学习成本高的问题，本项目发明了口颌系统影像自动建模与智能手术规划方法，包括图像融合、组织分割和自动规划三个核心技术。提出一种多模态图像融合网络 UTSRMorph，基于 Transformer 架构和超分辨率特征提取实现了口颌系统

多模态影像的高精度自动融合。针对口腔内细小结构，提出基于记忆库的小波滤波融合网络（MWNet），通过记忆小波卷积同步提取目标类别与邻域细节，创新设计结合交叉注意力与记忆压缩的长时记忆库追踪机制，实现了颌骨、牙列、上颌窦、下颌神经管等关键解剖结构的全自动、高精度分割；构建了用于牙种植手术规划的计算几何库和有限元分析模型，实现了种植体植入位点、角度、深度的智能化、最优化设计，突破传统种植规划软件数据不兼容、不互通而形成的“数据孤岛”问题。上述技术将种植方案规划与手术组件设计从传统方法的 8 小时显著缩短至 0.5 小时，学习周期从 3 天缩短至 4 小时。成果授权国内发明专利 23 项，国际发明专利 6 项，文章发表在中科院一区顶刊 T-MI 和 IJOS 上。

## **2.独创基于口腔环境术中感知的空间配准与动态追踪方法，研发了机器人视觉感知随动系统，为口腔种植机器人手术的精准性与安全性提供了重要保障。**

口腔种植手术面临骨内操作“盲视”的难题，医生只能依靠经验推断器械实际位置。局麻状态下患者颌骨持续发生微小运动，机器人必须能够实时跟随以保证手术安全与精准。针对上述问题，本项目发明了基于口腔环境术中感知的空间配准与动态追踪方法，包括高效注册、自主随动和主动约束三个核心技术。提出了多模态单次扫描配准技术，仅需一次术前三维影像扫描结合口扫数据即可完成高精度空间注册；首创高帧率红外光学定位与可见光三维实时重建相融合的随动补偿技术，追踪患者头部微小变化；提出了基于视觉感知和动力学控制的人机协同交互主动约束技术，可以实现任意可微几何形状的主动约束，提高机器人与人交互中的安全性。上述技术将机器人注册精度提高到 0.2 mm，动态响应时间提升至 0.2 秒内，人机交互安全约束精度提高到 0.5 mm 以内。成果授权国内发明专利 11 项，国际发明专利 4 项，文章发表发表在中科院一区、口腔专业顶刊 IJOS 和 COIR 上。

## **3.发明基于视觉-力觉融合的手术场景理解与仿生操作方法,研发了机器人多模态信息融合协同控制自主操作系统，实现了颌骨复杂骨质条件下的精准种植。**

针对颌骨骨质条件复杂，医生难以实时准确感知骨质，种植器械易向低密度区偏斜导致种植偏差的问题，本项目发明了基于视觉-力觉融合的手术场景理解与仿生操作方法，包括骨质感知、仿生控制和精度补偿三个核心技术。提出了高精度六维力传感器与种植手机扭矩检测技术，精确检测钻孔过程中的轴向阻力以

及侧向偏移力分量,推断骨质密度;研发了基于骨密度反演的非线性预测控制器,通过实时骨密度反演计算实现亚秒级仿生控制动作;提出光学跟踪实时位姿数据、机械臂关节编码器以及末端执行器的高灵敏度力反馈信号三者深度融合技术,对机械臂末端执行器在复杂受力情况下可能发生的微小形变进行实时补偿。上述技术可将手术精度由仅在单一伺服控制下的 0.7 mm 提升至多模态伺服协同控制下的 0.3 mm 内,有效提高了美学区即刻种植、上颌窦提升种植等复杂手术的精度。成果授权国内发明专利 11 项,国际发明专利 1 项。

项目共授权国内发明专利 45 项,国际发明专利 11 项;发表相关论文 41 篇。成果转化后的产品作为我国原始创新的大型口腔医疗设备获批国家三类医疗器械注册证 2 张、二类医疗器械注册证 1 张,作为第一款出口的口腔手术机器人成功进入欧洲与东南亚医疗市场。目前已售出产品 86 台(国内 84 台,国外 2 台),累计产生直接、间接经济效益 4.49 亿元。

## 七、客观评价

### 1. 国内外重要科技奖励:

发明成果在第 28 届全国发明展览会上,获“一带一路”暨金砖国家技能发展与技术创新大赛金奖;荣获科技部 2022 年颠覆性技术创新大赛总决赛优秀奖;人民日报 2022 年健康中国论坛十大医疗器械;2021 年度“科创中国”榜单生物医药领域先导技术;中国医学科学院 2023 年度重要医学进展(口腔医学领域)、2024 年中国发明协会“发明创业奖”;

### 2. 部分学者对本项目创新成果的客观评述:

(1)当代著名的未来学家、人工智能的创始人之一 Ray Kurzweil 教授在其新著《奇点更近》中将这款自主式口腔种植机器人与美国 Star 肠吻合机器人、Neuralink 的脑机接口植入机器人并称为人工智能与机器人结合的三个典范。

(2)香港大学牙医学院原副院长、瑞典马尔默大学 Nikos Mattheos 教授在口腔种植领域顶刊 Clin Oral Implants Res 上高度肯定了自主式口腔种植机器人技术,他指出:“这项技术已经超过了概念验证的阶段,正在飞速发展。”

(3)国际数字牙科协会候任主席,比利时鲁汶大学 Reinhilde Jacobs 教授在 J Dent 赞扬了基于口颌系统多结构 CBCT 影像 AI 自动分割技术“展现了人工智能提升临床应用的巨大潜力,其提供的创新工具能够以更个性化、精准化和标准化的方

式，显著提高诊疗方案制定和牙科手术的精确性与效率”。

八、应用情况和效益

(一) 应用情况

截至 2025 年 7 月 31 日，产品已在全国 300 多家医院及口腔诊所推广使用，覆盖 31 个省级行政区域，累计为 10787 名患者植入种植体 16,781 颗。此外，团队已与香港大学牙医学院、西班牙马德里口腔医学中心、阿尔巴尼亚地拉那大学等机构建立了长期合作，共同推进机器人技术的临床验证与迭代优化。本项目系列创新成果应用在包括口腔 A+学科四川大学华西口腔医院、北京大学口腔医院在内的全国主要口腔医院和我省多家口腔医疗单位，取得了良好的临床效果和社会效益。

部分应用情况如下：

| 序号 | 单位名称     | 应用的技术     | 应用对象及规模        | 应用起止时间        | 单位联系人/电话             |
|----|----------|-----------|----------------|---------------|----------------------|
| 1  | 北大口腔     | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 136 例 | 2025 年 5 月-今  | 刘峰<br>/01053295271   |
| 2  | 浙大口腔     | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 117 例 | 2022 年 12 月-今 | 杨国利<br>/057187219287 |
| 3  | 上海交大     | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 102 例 | 2023 年 6 月-今  | 史俊宇<br>/02153115299  |
| 4  | 武大口腔     | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 347 例 | 2023 年 5 月-今  | 夏海斌<br>/02787686600  |
| 5  | 山东省立口腔医院 | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 264 例 | 2023 年 5 月-今  | 邹虎威/<br>053168777980 |
| 6  | 西交大口腔    | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 423 例 | 2022 年 12 月-今 | 周秦<br>/02987216030   |
| 7  | 重医口腔     | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 453 例 | 2023 年 9 月-今  | 黄元丁<br>/02386362278  |

|    |            |           |                |               |                   |
|----|------------|-----------|----------------|---------------|-------------------|
| 8  | 抚顺毕宏伟口腔门诊部 | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 634 例 | 2024 年 5 月-今  | 毕宏伟 /0245688 6666 |
| 9  | 汉中市口腔医院    | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 176 例 | 2022 年 10 月-今 | 孙烨 /0916253 6205  |
| 10 | 宝鸡市口腔医院    | 机器人口腔种植技术 | 牙列缺损缺失患者 225 例 | 2023 年 1 月-今  | 董翼 /0917352 2823  |

（二）经济效益和社会效益

口腔手术机器人系统作为一种颠覆性的数字化诊疗工具，正深刻改变着传统口腔种植领域的临床实践模式，为医生和患者带来了多方面的显著获益。项目不仅展现了巨大的经济效益，更蕴含着深远的社会意义。

（1）经济效益

可观的经济效益：截至 2025 年 7 月 31 日，该机器人系统共产生经济收益 4.49 亿，包括：已销售产品 86 台（国内 84 台，国际 2 台），累计产生直接经济效益 1.37 亿元；成功为 10787 名患者完成 16781 颗种植体的精准植入，均取得了满意的临床治疗效果，按照目前种植市场价格，植骨患者单颗费用 1.3 万元左右，不植骨患者单颗费用 0.7 万元左右，平均单颗牙种植手术 1 万元，1.6 万颗种植体植入手术共产生间接经济收益 1.67 亿元；相关产品累计引入战略投资 1.44 亿元。

远期市场规模与经济贡献的预期：预计，到 2030 年，口腔手术机器人在国内市场的推广数量将超过 1000 台，届时，机器人相关的软硬件销售及配套服务产生的年销售额将有望达到 20 亿人民币。随着产品通过 CE、FDA 等国际认证并顺利进入海外市场，预计到 2030 年，口腔手术机器人在国际市场的推广数量将超过 200 台，相关的软硬件及服务销售额将达到 4000 万美元，累计完成国内手术案例将超过 5 万例、海外手术案例将超过 1 万例。国际市场的成功开拓将进一步提升产品的品牌价值和全球市场份额。

带动相关产业链协同发展与创造巨大经济附加值：口腔手术机器人的普及应用，将有力带动整个口腔医疗产业链上下游的协同发展。例如，对手术机械臂、机器视觉、高精度 CBCT、口内扫描仪、CAD/CAM（计算机辅助设计/计算机辅

助制造）系统、口腔 3D 打印设备及材料、高性能种植体及修复材料、手术耗材等的需求将大幅增加，从而促进这些相关产业的技术创新和市场扩张。

(2) 社会效益

提升患者就医体验与满意度：机器人的微创操作特性意味着更小的手术创口、更轻的术后反应（如肿胀、疼痛）、更快的恢复周期，这些都极大地改善了患者的就医体验。同时，手术的高精度度和可预测性也带来了更理想的长期修复效果，从而提高了患者的整体满意度。

提升国民口腔健康水平与生活品质：口腔健康是全身健康的重要组成部分。牙齿缺失不仅影响咀嚼、发音等基本生理功能，还可能导致营养不良、消化系统疾病，甚至影响心理健康和社交活动。本项目通过提供更精准、更安全、更高效、更舒适的缺牙修复方案，能够帮助数以百万计的缺牙患者恢复正常的口腔功能，重拾自信笑容，从而显著提升国民的整体口腔健康水平和生活品质。

推动优质医疗资源均衡分布与可及性：我国口腔医疗资源，特别是高端种植技术和资深专家，主要集中在经济发达地区的大城市和大型公立医院，基层地区和中小城市往往面临技术和人才的双重匮乏。口腔手术机器人及其配套的远程支持和培训体系，能够有效赋能基层医疗机构，使其具备开展复杂种植手术的能力，从而打破地域壁垒，让更多地区的患者能够就近享受到高水平的口腔医疗服务，能够有力推动优质医疗资源的均衡分布和普惠可及。

积极应对人口老龄化挑战：随着我国人口老龄化进程的加速，老年人群体的口腔健康问题日益突出，牙齿缺失率居高不下，对种植修复的需求也随之激增。传统的人力密集型种植模式难以满足如此庞大且快速增长的需求。口腔手术机器人通过提升效率、降低对资深医生数量的依赖，为应对人口老龄化带来的口腔健康挑战提供了创新的技术解决方案。

引领和带动口腔医疗产业的创新升级：口腔手术机器人技术的突破和成功应用，将极大地激发国内口腔医疗器械行业的创新活力，促进相关领域（如医学影像、生物材料、3D 打印、人工智能、医疗信息化等）的技术进步和产业升级，提升我国在高端医疗装备领域的整体竞争实力。

九、主要知识产权目录

| 序号 | 知识<br>产权 | 知识产权具<br>体名称 | 国家<br>(地 | 授权号 | 授权日<br>期 | 证书编<br>号 | 权利人 | 发明人 |
|----|----------|--------------|----------|-----|----------|----------|-----|-----|
|----|----------|--------------|----------|-----|----------|----------|-----|-----|



|   |      |   |    |                       |                 |                                       |                     |                              |
|---|------|---|----|-----------------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------------|
|   | 类别   |   | 区) |                       |                 |                                       |                     |                              |
| 1 | 发明专利 | 一种用于口腔种植手术的智能机器人系统  | 中国 | ZL 2017 1083529 1.X   | 2024 年 2 月 09 日 | 6702516                               | 雅客智慧（北京）科技有限公司（转化后） | 赵铎民，白石柱，王利峰，胡磊，谢瑞，吴秦         |
| 2 | 发明专利 | Calibration Method and Device For Dental Implant Navigation Surgery, And Tracking Method And Device For Dental Implant Navigation Surgery | 美国 | PCT/CN 2019/08 5676   | 2022 年 2 月 24 日 | US0120 11230B2                        | 雅客智慧（北京）科技有限公司      | 王利峰                          |
| 3 | 发明专利 | 基于双目视觉定位的全息三维影像空间定量投影方法   | 中国 | ZL 2021 1 0278046 .X  | 2022 年 9 月 30 日 | 5488531                               | 北京航空航天大学            | 王君臣，朱辉，宋友                    |
| 4 | 论文   | Fully automatic AI segmentation of oral surgery-related tissues based on cone beam computed tomography images                             | 中国 | 2024 May 8;16(1): 34. | 2024 年 5 月      | International Journal of Oral Science | 中国人民解放军第四军医大学       | 刘昱，谢瑞，王利峰，刘洪澎，刘琛，赵铎民，白石柱，刘文勇 |
| 5 | 论文   | The evolution of  | 中国 | 2024 Apr              | 2024 年 4 月      | International                         | 中国人民解放军             | 刘琛，刘昱晨，谢瑞，                   |

|    |      |   |    |                         |                  |                                |                |                               |
|----|------|---|----|-------------------------|------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|
|    |      | robotics: research and application progress of dental implant robotic systems                                     |    | 8;16(1):28.             |                  | Journal of Oral Science        | 军第四军医大学        | 李志文, 白石柱, 赵铤民                 |
| 6  | 论文   | Clinical evaluation of autonomous robotic-assisted full-arch implant surgery: A 1-year prospective clinical study | 中国 | 2024 Apr;35(4):443-453. | 2024 年 4 月       | Clinical Oral Implant Research | 中国人民解放军第四军医大学  | 谢瑞, 刘昱晨, 魏洪波, 张婷民, 白石柱, 赵铤民   |
| 7  | 发明专利 | 一种具有零空间避障能力的基于阻抗控制的人机协同方法   | 中国 | ZL 2023 1 0233906 .7    | 2023 年 9 月 8 日   | 6308496                        | 北京航空航天大学       | 王君臣, 卢春姮                      |
| 8  | 发明专利 | 用于口腔种植手术的定位装置及手术路径规划方法  | 中国 | ZL 2019 1 0536712 .8    | 2021 年 8 月 17 日  | 4617430                        | 雅客智慧(北京)科技有限公司 | 王利峰, 沈晨, 刘洪澎                  |
| 9  | 发明专利 | 种植牙机器人系统及其种牙方法  | 中国 | ZL 2019 1091903 4.3     | 2024 年 11 月 05 日 | 7499556                        | 雅客智慧(北京)科技有限公司 | 王利峰, 沈晨, 孙贝, 刘洪澎              |
| 10 | 论文   | Endodontic Microsurgery With an Autonomou s Robotic System: A   | 中国 | 2024 Jun;50(6):859-864. | 2024 年 6 月       | Journal of Endodontics         | 中国人民解放军第四军医大学  | 刘琛, 柳鑫, 王馨, 刘昱晨, 白玉, 白石柱, 赵铤民 |

|  |  |                    |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--------------------|--|--|--|--|--|--|
|  |  | Clinical<br>Report |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--------------------|--|--|--|--|--|--|

## 十、完成人合作关系说明

本项目由中国人民解放军空军军医大学白石柱研究员牵头完成。白石柱研究员是空军军医大学第三附属医院数字化口腔医学中心主任，研究员、副主任医师，博士生导师，任中华口腔医学会口腔颌面修复专委会候任主任委员，陕西省口腔医学会数字化口腔医学专委会主任委员，主持设计、指导、完成了本项目的所有内容。白石柱研究员师从赵铤民院士，长期开展数字化口腔医学的相关研究与临床应用，与项目合作人赵铤民院士（中国人民解放军空军军医大学）、王利峰博士（北京航空航天大学）合作完成课题“口腔治疗智能机器人研究—小型模块化口腔种植机器人系统研发”。与项目合作人北京航空航天大学王君臣副教授合作完成“口腔治疗机器人配准方法研究”、开展“双臂协同颅颌面手术机器人系统的研发”等研究。相关科研成果由空军军医大学转化给王利峰博士创立的雅客智慧（北京）科技有限公司；由该公司完成科研成果的产业化，取得 NMPA 三类医疗器械注册证，并进行市场推广。项目合作人中国人民解放军空军军医大学谢瑞副主任医师、刘琛主治医师在研究生课题阶段承担了本项目的部分研究工作，并作为项目负责人同科室工作人员，参加完成了本项目各部分的实验设计、结果分析和推广应用。项目负责人白石柱研究员与赵铤民院士、王君臣副教授、王利峰博士、谢瑞副主任医师、刘琛主治医师共同撰写了国内首部口腔种植机器人专著《自主式口腔种植机器人》。

第一完成人签名：

白石柱