

机器人在口腔医学领域的应用

赵瑞峰, 李志文, 白石柱

(空军军医大学第三附属医院数字化中心 陕西 西安 710032)

摘要 机器人具有精准、高效、稳定等特性, 已应用于各行各业。目前, 在口腔治疗中的应用取得了阶段性成果。它不仅减轻了临床医生的工作强度, 而且提高了治疗的精确性。本文就目前机器人在口腔医学领域的应用和研究现状做一综述。

关键词 机器人; 口腔医学; 种植术; 数字化医学

中图分类号 R608 R78 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2022) 05-0351-16

Application of surgical robots in stomatology

ZHAO Ruifeng, LI Zhiwen, BAI Shizhu

(Digital Center, the Third Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an 710032, China)

Abstract With precision, efficiency, stability and other characteristics, robots have been used in various fields. At present, its application in stomatology has achieved phased results. It not only reduces the intensity of clinician's work, but also improves the accuracy of treatment. This article reviews the application and research status of robots in the field of stomatology.

Key words Surgical robot; Stomatology; Dental implant; Digital medicine

收稿日期: 2021-07-22 录用日期: 2021-10-12

Received Date: 2021-07-22 Accepted Date: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (81970987); 陕西科技创新团队项目 (2021TD-46)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (81970987); Shaanxi Science and Technology Innovation Team Project (2021TD-46)

通讯作者: 白石柱, Email: baishizhu@foxmail.com

Corresponding Author: Bai Shizhu, Email: baishizhu@foxmail.com

引用格式: 赵瑞峰, 李志文, 白石柱. 机器人在口腔医学领域的应用 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2022, 3 (5): 351-366.

Citation: ZHAO R F, LI Z W, BAI S Z. Application of surgical robots in stomatology[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2022, 3(5): 351-366.

机器人是一种人工制造的能够半自主或全自主工作的智能机器。其具有感知、决策、执行等基本特征，可以辅助甚至替代人类完成危险、繁重、复杂的工作，提高工作效率与质量，服务人类生活，扩大或延伸人的活动及能力范围。随着数字化设计和数控制造的发展，机器人技术已经迅速扩展到与人类生活息息相关的各行各业。从外太空、深海、工业制造领域到微小分子，机器人已无处不在。新一代机器人有望在家庭、工作场所和社区安全等方面创造更多可能，在服务、娱乐、教育、医疗、制造和援助等方面提供支持^[1]。

从1996年美国Intuitive Surgical公司开发的达芬奇手术机器人系统^[2]问世，到如今口腔种植手术机器人等成果，机器人在医学领域取得了重大进展。

相比传统手术，机器人具有以下优势：

①突破了手术中术野空间的局限；②灵活结构控制技术可实现精确定位精准手术；③机器人工作稳定、可靠（安全），可重复性高；④实现手术微创化；⑤不间断连续工作，同时减少医生的职业暴露；⑥使远程手术成为可能。

1 医疗机器人的临床应用

1.1 神经外科

神经外科主要治疗的是由肿瘤、炎症、外伤等导致的脑部和脊髓等神经系统的疾病，因此对术者要求特别高，在切除病变组织的同时不能损伤邻近组织。神经外科手术机器人的应用使得神经外科手术越来越精细、微创。

由于人类疲劳会导致注意力不集中，机器人辅助有利于长时间的显微外科手术。Li Q H等^[3]使用NeuroMate机器人系统进行图像引导和辅助神经外科手术进行靶结构的立体定向，可以减少

人为错误，也可以节省涉及多个目标时活组织检查的手术时间，而且不易出错。Minchev G等^[4]研究表明，使用机器人进行立体定向手术的辅助可以提高精准度，缩短定位时间，而且对于年轻医生的学习曲线也会变短。

1.2 脊柱外科

脊柱外科机器人的主要作用是在术中通过影像系统进行实时导航，辅助医生进行椎弓根螺钉的植入。脊柱外科机器人可以克服外科医生手术时难以保证精准定位，手术时间过长容易导致疲劳等问题^[5]。术者只需要通过控制机械臂操纵手术工具，通过术中影像实时导航完成精细的手术动作，植入椎弓根螺钉的准确率为85%~100%^[6]。

1.3 放射治疗

对于一部分颅内肿瘤，使用内镜或显微神经外科的方法造成的创伤较大，术后重建颅底困难，且易引发感染等术后并发症^[7]。而使用传统放射外科的方法单次放射剂量过大易损伤入路和肿瘤周围组织；而放射剂量过小则肿瘤治疗效果不佳，且肿瘤周边易复发；同时还要在患者头部固定立体定向头架，进一步加重患者负担^[8]。

使用机器人引导进行放射治疗可以更加精准的覆盖肿瘤区域，避免造成靶器官周围组织的损伤；精准控制照射量，减少无关照射的产生；且不再使用立体定向头架，患者更舒适^[9]。

1.4 血管外科

血管吻合术对医生的技术和耐心是一种考验，同时也是传统腹腔镜行血管旁路术的主要难题。使用医疗机器人辅助医生进行血管吻合术已经取得了不错的效果^[10]：术者采用舒适的坐位在主控台进行手术操作，可缓解疲劳，能够轻松完成长时间的复杂手术；可以明显缩短

术中血管阻断时间，提高手术效率，减少术后并发症的发生；通过机械手能减少术者手部震颤对手术的影响，使操作更加精细^[11]。

1.5 腔内介入

血管腔内介入手术要在持续的X线照射下进行操作，长时间的辐射积累会给术者造成不可逆的伤害。术中术者无法直接控制导丝或导管的末端，从而需要频繁更换器材和反复操作，导致手术时间的增加，同时也会增加血管损伤的可能^[12-13]。

应用腔内介入机器人时，术者可以直接控制导丝或导管末端的前进方向，精准快速地到达目标部位，缩短手术时间的同时还降低了手术成本。且整个过程中术者不会受到X线辐射^[14]。

1.6 腹腔镜手术

腹腔镜手术相对于传统开放式手术创伤小、失血量少、术后患者疼痛轻、恢复快，因此得到了快速普及^[15]。但是腹腔镜手术同样存在其局限性，如器械并不完全符合人体工程学特点，限制了术者操作；手术视野较小导致手术操作时间长；术者注意力长时间高度集中容易疲劳；同时学习曲线也较长，尚无法完全替代传统手术^[16]。

达芬奇机器人系统经美国FDA批准已应用于临床20余年，是目前世界上外科手术应用最广泛的手术机器人系统^[17]。达芬奇机器人手术相较于腹腔镜手术和传统开放手术有明显优势：①具有可放大10~15倍的3D视野^[18]；②仿生器械和防震颤系统使得机器人的机械臂比术者的手更加稳定；③7自由度的机械臂关节使得末端夹持的手术工具能够在狭小的空间灵活运动^[19]；④在疗效上有明显优势^[20]；⑤学习曲线低；⑥术后手术并发症发生率低等^[21]。

1.7 骨科

骨科手术为硬组织操作手术，结构复杂，对操作精度要求高，而且手术术式多样、操作流程复杂。传统的骨科手术要求术者有足够的力气和耐心，手术强度大。而对于同为刚性结构的手术机器人来说，在该领域具有天然的优势。

手术机器人在骨科的应用主要包括骨折复位、骨折内固定、关节置换等^[22-24]。骨科机器人可以实现微创操作，减少因术中牵拉导致术者体力的快速消耗；通过术前规划进行术中精准定位，加快手术速度，最大限度地减少医患所受到的X线辐射；对患者创伤小，术后疼痛轻，降低感染、神经血管损伤等相关并发症发生的概率；使得远程操控进行临床手术成为可能^[25]。

2 医疗机器人在口腔医学领域的应用

近年来，随着机器人在医疗行业的不断发展，有不少学者开始将机器人技术应用于口腔修复、正畸、颌面外科、种植等多个领域。

2.1 口腔修复

2001年，吕培军等^[26]开展了使用机器人排牙的研究。机器人系统由电脑、CRS机器人、自行设计的电磁夹持器、两个排牙辅助器、中间块、光敏胶水、持胶盘、标准人工牙、工作桌、光源和光缆线等组成（如图1）。机器人机械臂只需要通过夹持和放置中间块，就可以达到排牙目的。由于中间块外形是一致的，所以能够更加容易、精确地控制。研究结果表明，该机器人在空间位置的计算上表现良好，为替代人工排牙并制作全口活动义齿打下了良好基础。

人工牙的形状比较复杂，单个机器手臂不容易准确地抓持和操作。2011年，张永德等^[27]提出了用多操作机排牙的方法，并设计了一种基

于多机械手和牙弓的新型全口义齿制作装置（如图2）。该装置采用基于全口义齿排牙原理的分析方法，建立了多机械手排牙机器人的运动学模型。利用其进行了初步排牙实验，可以根据颌弓参数自动设计制作一副适合患者的全口义齿。实验结果验证了多机械手排牙机器人运动学模型的有效性和其实现全口义齿制作策略的可行性。

2014年，WANG D X等^[28]设计了一种微型机器人装置，为临床牙冠预备提供了一种新的方案（如图3）。该机器人通过控制振镜的上下和旋转运动，以及透镜的前后平移，从而控制激光点覆盖牙齿的每个牙面。其包括以下部分：微型机器人末端执行器、牙齿夹具、飞秒激光

发生器、激光传输臂、激光扫描仪和计算机控制台。实验结果表明，激光点束的运动范围可以完全覆盖人工牙和离体牙的各个部位。激光焦点的重复性结果表明，平均误差约为40 μm ，通过实验证实了备牙机器人的可行性。

2.2 口腔正畸

精准的弓丝弯制是固定矫治的关键技术。与传统手工弯制相比，使用具有精确形态控制能力的机器人可以提高弓丝弯制的精度和效率。2004年，Werner B等^[29]设计了一种名为“SureSmile”的双手弓丝弯制机器人，它能准确、自动地弯制弓丝。

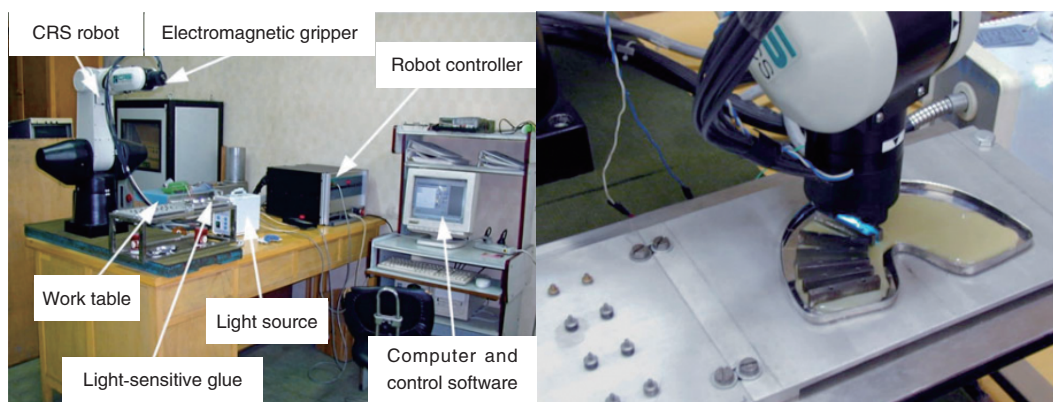


图1 全口单机械臂排牙机器人^[26]

Figure 1 Single-manipulator tooth-arrangement robotic system for complete dentures

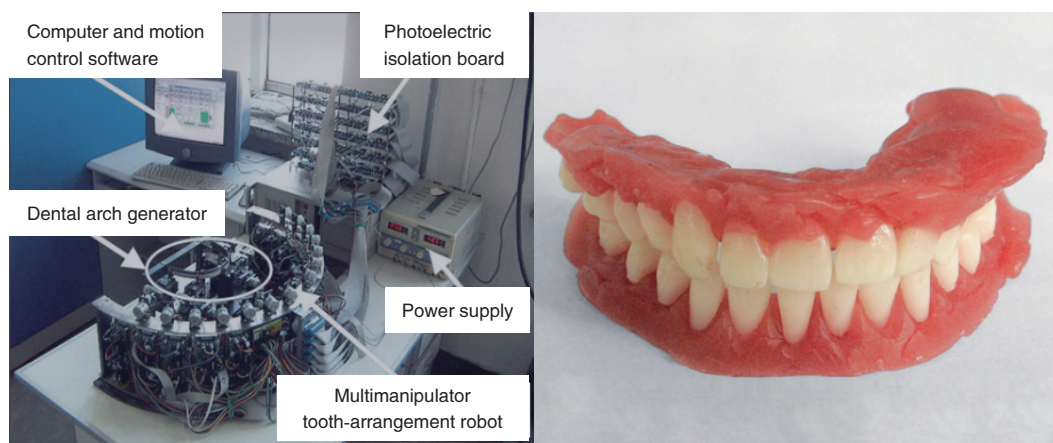


图2 多操作机排牙机器人与排完的全口义齿^[27]

Figure 2 Multimanipulator tooth-arrangement robotic system

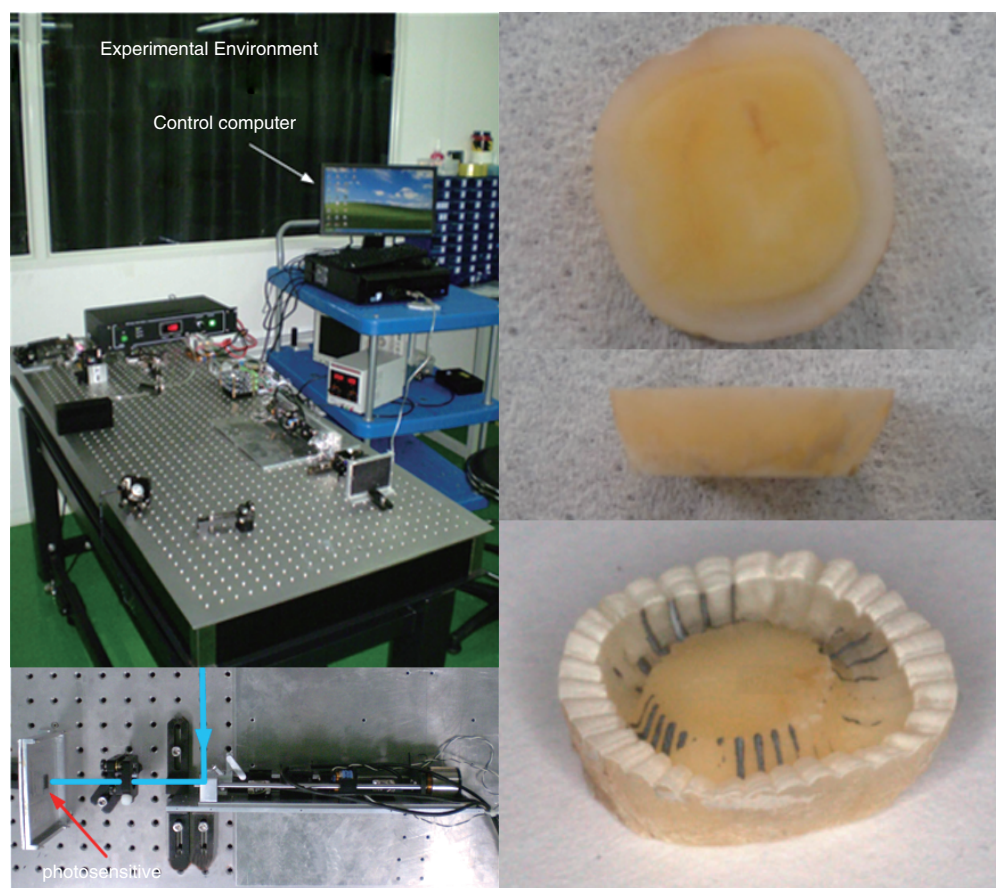


图3 激光备牙机器人与预备的牙齿^[28]

Figure 3 Laser tooth preparation of robotic system and prepared tooth

2009年,张永德等^[30]和杜海艳等^[31]制作了基于Motoman UP6的弓丝弯制机器人(如图4),与传统用于工业的Motoman机器人的运动控制不同,其末端可以实现小范围内较复杂的曲线运动,以满足弯制复杂形状弓丝的要求。随后,为了提高机器人弯制弓丝的精度和可靠性,张永德等基于不同弓丝回弹特性,在有限元分析软件MSC.Marc上建立弓丝弯制模型,模拟实际的弓丝弯制过程,从而得到弓丝仿真回弹特性。同时,采用机器人进行不同角度的弯制,手动测量得到弓丝的回弹角度,通过多次实验和误差分析得到弓丝弯制的实际回弹特性。由软件所得仿真数据和实验数据,分析误差的来源和改进方法,从而确定常用的镍钛合金弓丝、不锈钢弓丝、 β -钛合

金弓丝和澳丝的回弹特性数据曲线,为采用机器人进行矫正弓丝的弯制提供了依据。

2011年,Gilbert开发了一种名为LAMDA的机器人系统^[32],用于精确快速地弯制正畸弓丝(如图5)。其采用龙门式结构设计,弯曲精度高,效率高。设备的价格相对较低,但缺点是他只能弯曲一条平坦的曲线。

2013年,在对弓丝成形的过程进行分析的基础上,蒋济雄等^[33]搭建了弓丝弯制机器人及其控制系统(如图6)。其建立的标准和带外展弯的正畸弓丝数学模型成功拟合了机器人弯制弓丝时的回弹参数,提高了弓丝弯制精度和效率。通过将该机器人弯制的正畸弓丝应用于1例正畸患者,验证了机器人及其控制规划模型的有效性和实用性。

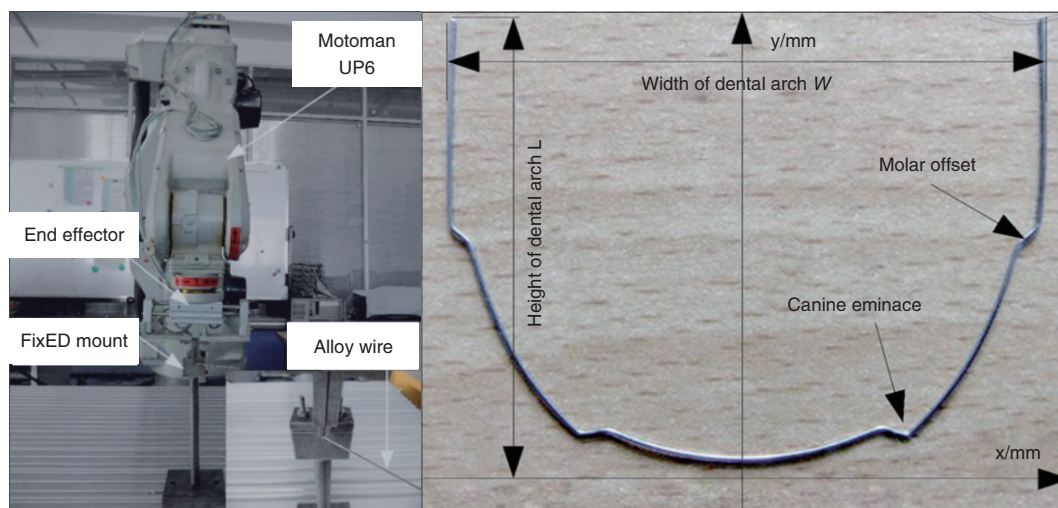


图 4 正畸弓丝弯制机器人^[30]

Figure 4 Orthodontic archwire-bending robot

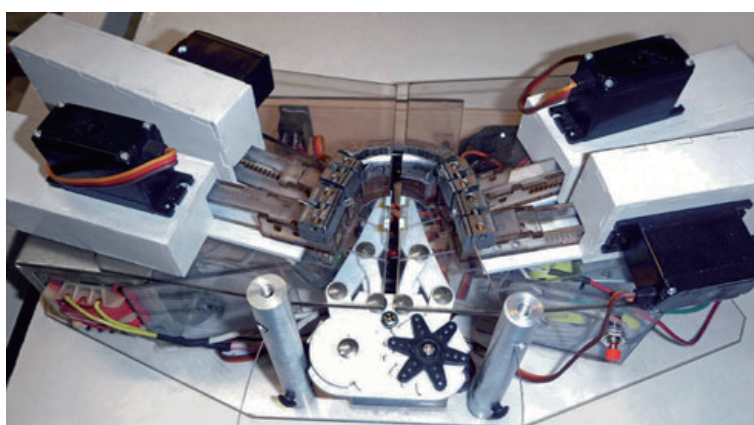


图 5 LAMDA 弓丝弯制机器人系统^[32]

Figure 5 LAMDA archwire-bending robotic system

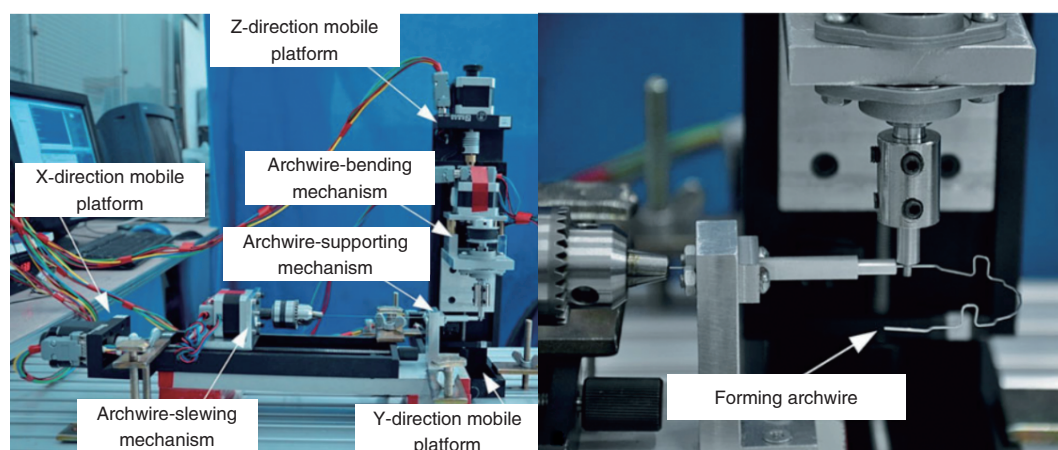


图 6 弓丝弯制机器人^[33]

Figure 6 Archwire-bending robot

2014年, XIA Z Y等^[34]和郭杨超等^[35]设计了正畸弓丝弯制机器人专用的末端执行器, 使之在正畸弓丝弯制的过程中可以根据需要自动更换钳头(如图7)。针对弓丝弯制过程中的回弹问题, 研究不同材料正畸弓丝的弯曲回弹特性, 设计出相应的补偿方案, 提高了自动弯曲的精度与效率。为了获得机器人弓丝弯制的运动轨迹节点, 根据医师的弯制流程和动作, 对正畸弓丝进行参数化设计, 并根据设计参数自动生成一条弯制路径, 从而实现正畸弓丝自

动化弯制。最终基于ROS与Gazebo建立了机器人仿真平台, 对机器人的运动轨迹进行分析, 验证了机器人路径的合理性。

2.3 牙体牙髓治疗

虽然根管治疗技术已经在临床应用多年, 但其操作差异大, 成功率与医生个人的经验与技术水平关系较大。为了使根管治疗标准化、精确化和高效化, Dong J等^[36]于2007年尝试开发多功能微型根管治疗机器人(如图8)。该机器人可以放置在患者的口腔内, 固定于牙齿上,

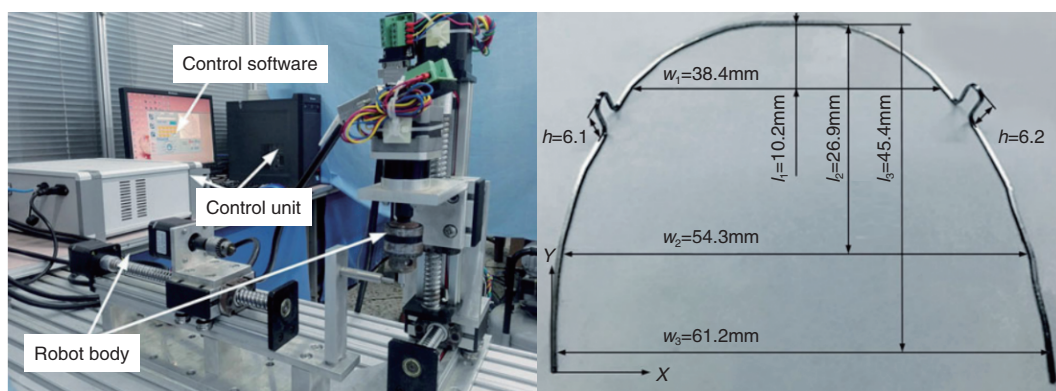


图7 弓丝弯制机器人^[34]

Figure 7 Archwire-bending robot based on LabVIEW and ATmega 2560

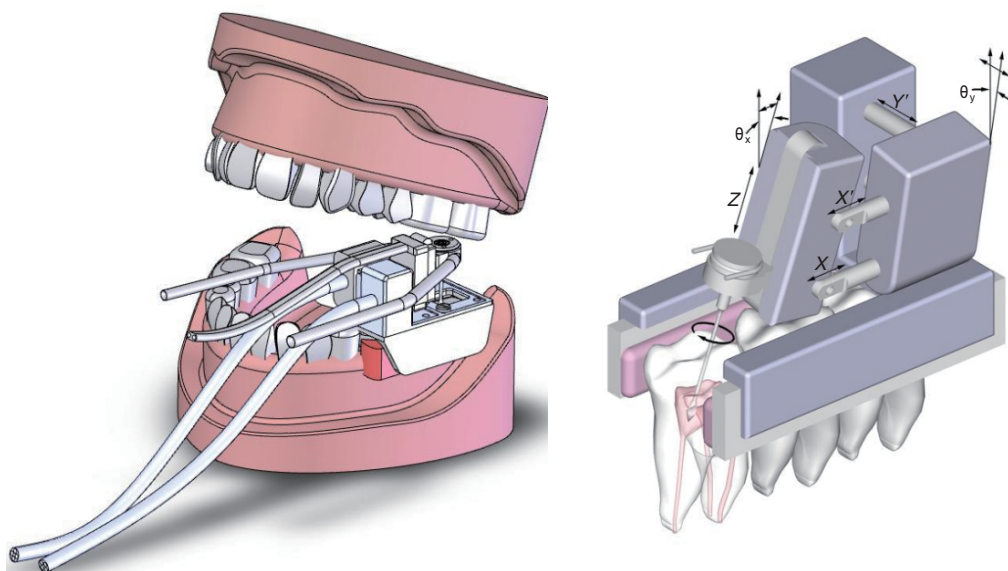


图8 微型根管治疗机器人^[36]

Figure 8 Robot for micro root canal therapy

通过 Z 轴执行器来控制根管器械的运动和更换装配,从而高效、可靠地进行根管治疗。

2010 年, Ortiz Simon J L 等^[37]开发了一个辅助抓持牙钻的机器人,以协助医生更稳地手持牙钻(如图 9)。在预备窝洞时,机器人辅助医生使用平稳而精确的动作来操纵牙钻。其最大限度地减少了由于疲劳引起的牙钻震颤,降低了医源性口腔损伤的风险。该研究的结果表明,此机器人使钻针的定位准确率提高了 53%。

根管治疗要连续地使用多达数十种器械,而手动选择器械是一个相当低效的过程;再者,治疗器械占用了移动推车或治疗台上的大部分面积。Nelson C A 等^[38]制作了一种新型的“器械选择和递送机器人”(如图 10),它能够有效解决这些问题。这种机器人能执行预先设置好的命令,自动按照预设的顺序逐个递送器械,有效提高了根管治疗的效率,保持了台面的整洁。在实际应用中,该机器人为整个治疗过程节省了 4.4% 的时间。

2.4 口腔颌面外科手术

2.4.1 正颌外科

传统截骨术只能线性截骨,很难进行复杂形状的截骨,精度也很难保证。为了解决这一问题,2010 年, Burgner J 等^[39]基于短脉冲激光消融系统成功制作了正颌截骨机器人(如图 11)。其支持任意形状的截骨术。实验采用了猪骨头,预先根据骨 CT 进行截骨线的规划;整个截骨过程由机器人辅助激光消融系统自主执行;术后测量结果显示,整体定位精度为 0.5mm。

颌颌面区具有精细复杂的解剖结构,在这个区域进行手术需要外科医生具有高超的技术和灵巧的双手。为了提高手术中的准确性,在 2015 年, GUI H 等^[40]设计和制造了一种 7 自由

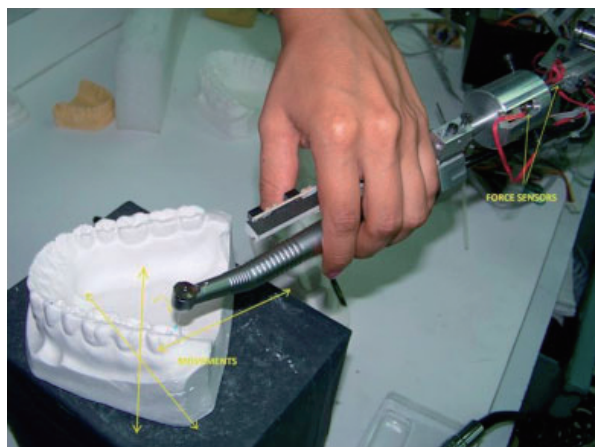


图 9 辅助抓持牙钻的机器人^[37]

Figure 9 Robot for dental drill handling

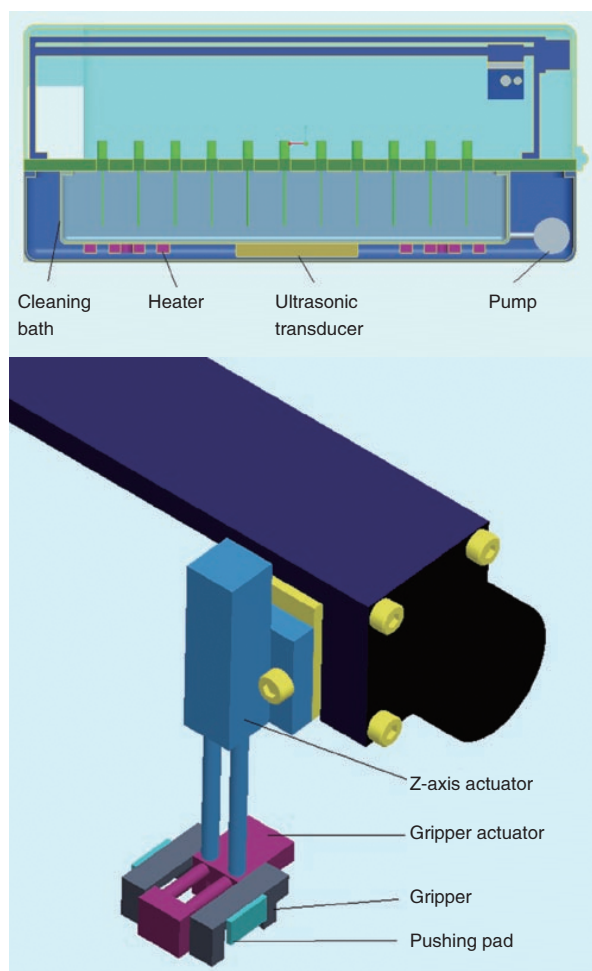


图 10 器械选择和递送机器人^[38]

Figure 10 Vending machine for supplying robot canal tools

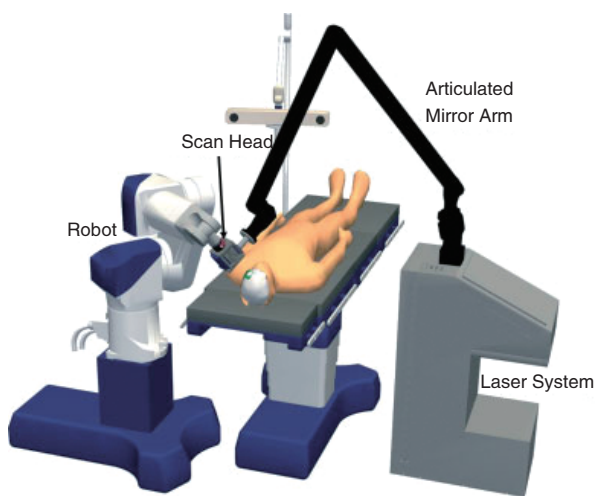


图 11 正颌截骨手术机器人系统^[39]
Figure 11 Orthognathic osteotomy robotic system

度机械臂手术机器人。这款机器人基于 Gui 等人自己开发的导航系统 TBNAVIS-CMFS，主要用于正颌手术中的精确截骨。机器人在导航系统的可视化条件下，通过预先设计，成功地进行了 Le Fort I 型截骨手术。

2015 年，Baek K W 等^[41]研究了 ER: YAG 激光器在截骨手术中的应用，其主要优势是复杂形状的截骨和截骨精度的控制。他们制作了一种使用激光截骨的手术机器人系统（如图 12）。这种激光机器人可在手术室中进行临床应用，其优势在于多种环境下可操控，适合个性化骨瘤切除和复杂形状的截骨术。

2019 年，Ma Q 等^[42]使用无标记导航模块建造了一种口腔颌面外科机器人系统（如图 13）。该团队提出了一种新的概念来处理患者、医疗设备和外科医生之间的关系，即利用患者自己的器官作为姿势识别的自然标志，让机器成为手术的主要操作者，将外科医生的工作优先级从术中实施转变到术前规划。他们认为，这种手术关系的变化最终可能有利于未来数字化口腔颌面外科的发展。

2.4.2 腭裂修复

局限的操作空间和复杂的环境，大大增加了腭裂修复术的难度。随着机器人腹腔手术方

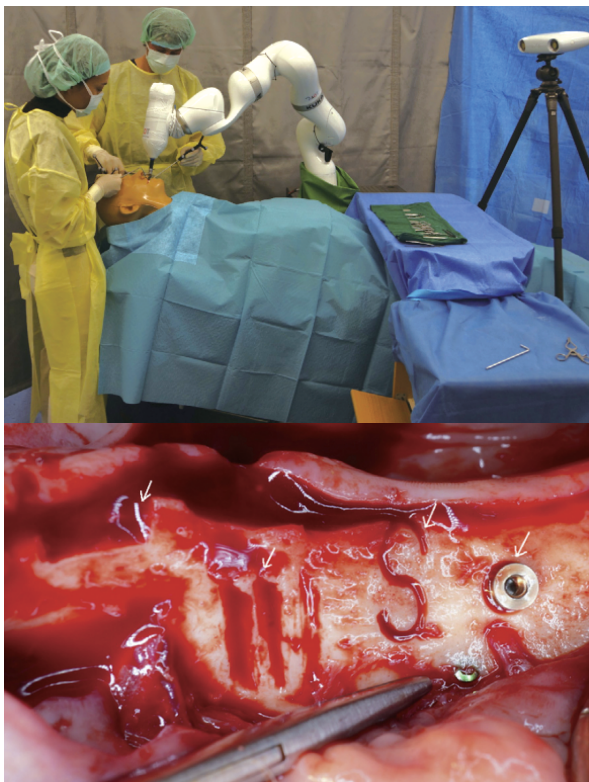


图 12 ER: YAG 激光截骨机器人^[41]
Figure 12 ER: YAG laser osteotomy robot

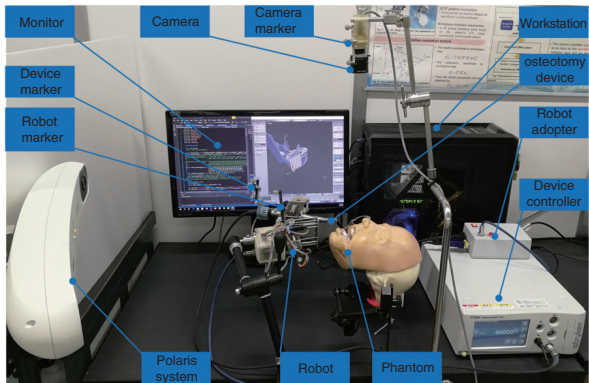


图 13 无标记导航模块组成的口腔颌面外科机器人^[42]
Figure 13 A markerless navigation module and a compact OMS robot

式的成熟，2015 年，Khan K 等^[43]基于达芬奇手术机器人，探索了使用机器人进行腭裂修复术的可行性。先是对 1 名儿童的气道模型进行腭裂手术模拟（如图 14），然后对尸体进行机器人辅助的 Hynes 咽成形术。结果表明，由于更

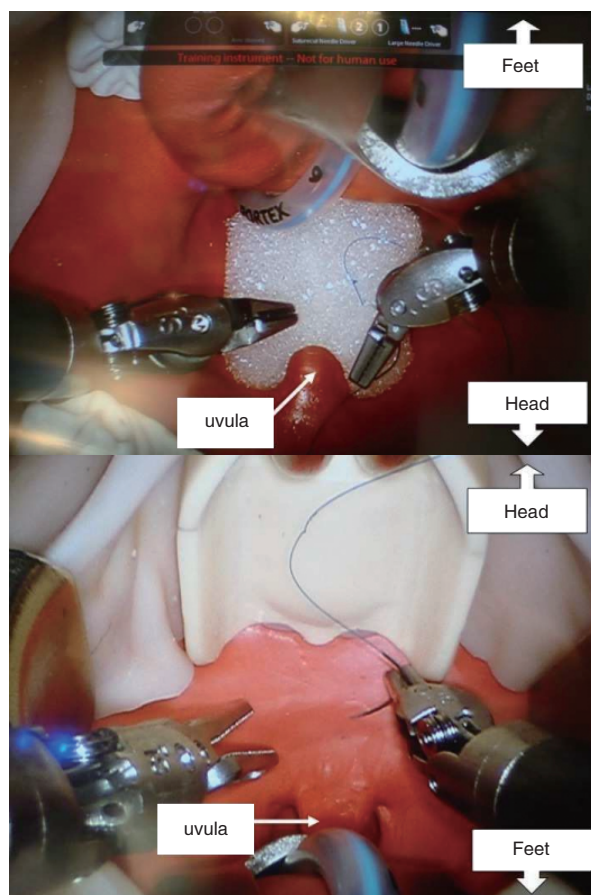


图 14 利用气道模型模拟达芬奇手术机器人腭裂手术^[43]
Figure 14 Simulation of Da Vinci surgical robot cleft palate operation using airway model

直观的视野和更清晰的解剖结构，使用机器人辅助腭裂手术可以大大提高外科医生进行难度较大的腭和后咽手术的能力，也为新技术开发奠定了基础。这种手术方式不仅降低了术中二次伤害的风险，而且更容易学习。

同年，Nadjmi N 等^[44]也研究了达芬奇手术机器人修复腭裂的可行性，以及尸体上人机（患者-机器人）的最佳手术姿势，然后在临床实践中使用该机器人完成了 10 例腭裂修复手术，术中和术后无并发症。虽然住院时间比传统手术缩短 1.4d，但手术时间平均延长 35min。Nadjmi 认为口腔机器人修复腭裂可以减少对血管、腭肌、神经和黏膜的损伤。修复术后，后腭部和咽鼓管功能均得到改善。此外，

高分辨率的三维图像提供了良好的空间感知，提高了手术精度，利于口内缝合，提高了手术安全性。与传统手术相比，机器人手术的姿势更加合理。

2.4.3 肿瘤切除

在传统的头颈部肿瘤切除术中，为了满足视野的需要，手术切口往往很大；这不仅造成严重的美学问题，而且对患者的术后生活产生心理影响。此外，舌根等区域使用传统手术方式特别难以操作。与传统的手术技术相比，手术机器人具有三维可视化，良好的止血，以及更好的操作自由度（约 360°）等优势，有望克服传统手术的。在 2011 年，Kayhan F T 等^[45]进行了第 1 例达芬奇手术机器人辅助切除舌根部腺样囊性癌的手术。采用口腔入路，避免了气管切开术、皮肤切口和下颌骨骨折，从而避免了术后颈部瘢痕。因此，近年来，达芬奇手术机器人已被用于咽旁间隙肿瘤的外科治疗，如多形性腺瘤^[46]、脂肪瘤^[47]和神经鞘瘤^[48]。然而，由于缺乏力反馈系统，在手术过程中很容易导致肿瘤包膜破裂。因此，如有必要，需要手动钝性分离。与传统手术相比，机器人切口较小，可隐藏在患者耳后发际线中。因此，术后美学满意度明显高于传统手术，但平均手术时间略长。

2.5 颞下颌关节功能障碍（TMD）的治疗

TMD 的特点是颞下颌关节疼痛，张口受限，颞下颌关节有弹响。目前常用保守治疗来缓解其临床症状。按摩作为一种物理保守疗法，在临床上广泛应用于 TMD 的治疗，取得了良好的效果。与传统按摩相比，机器人按摩不仅节省了人力，而且其程序化和标准化的按摩可以给患者良好的治疗体验。Ariji Y 等^[49]使用口腔康复机器人 WOA-1（如图 15），对 26 名不同类

型的 TMD 患者进行 3 次按摩（每次 10min）。他们发现，75% 的肌筋膜疼痛患者得到有效缓解，40% 的患者张口增加 5mm 甚至更多。

张口训练是治疗 TMD 所致张口受限的有效方法。Takanobu H 等^[50] 建立了一个用于横向运动训练的 6 自由度机器人，并治疗了 1 例 TMD 患者。结果表明，开口距离从 28mm 增加到 45mm，右侧 TMJ 横向运动距离从 9mm 增加到 15mm，左侧从 7mm 增加到 12mm。



图 15 使用口腔康复机器人 WOA-1 对志愿者进行按摩^[49]
Figure 15 Volunteers were massaged with the oral rehabilitation robot WOA-1

在 2015 年，Sun Y 等^[51] 构建了一种软质口腔康复机器人，该机器人由一种新型的软质气动执行器驱动，用于训练有张口受限的患者。他们通过一种特殊的模型对机器人的力学性能进行了研究，表明利用机器人进行张口训练是可行的。

2.6 手术机器人在口腔种植领域的应用

传统口腔种植技术中，种植位点精度、钻孔的力度等难以控制，种植成功率取决于医生的技术和经验。而已被广泛应用于临床的手术机器人，由于其精准、微创、安全、高效等特点，成为进一步提高口腔种植手术精度的重要方向。

2011 年，Sun X 等^[52] 设计了一种 6 自由度的三维图像引导机器人种植系统（如图 16）。根据术前锥形束 CT 图像重建患者的三维模型，并使用这些数字模型进行种植规划。他们提出了一种两步配准方法，从而将种植体植入的术前计划转化为术中操作所需的参数。该系统中

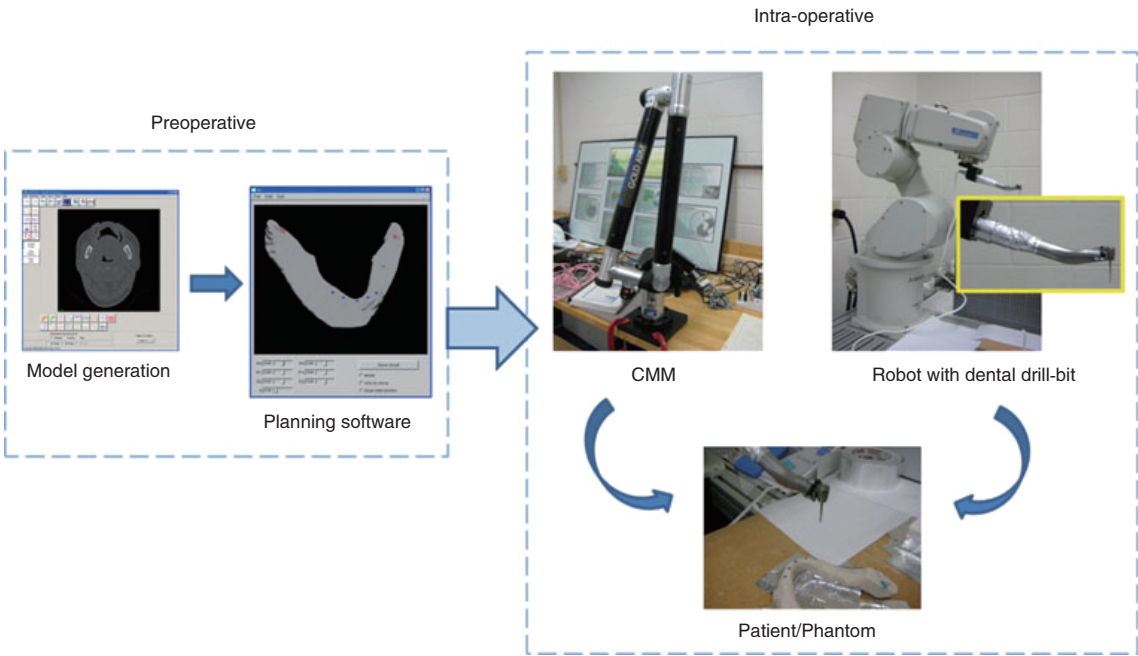


图 16 三维图像引导机器人种植系统^[52]
Figure 16 Robot implantation system guided by 3D images

引入了坐标测量器 (CMM) 作为参考坐标系, 避免了种植过程中机器人与患者的直接接触, 保证了患者的安全。体外实验表明, 该系统设计可行, 配准误差为 (1.42 ± 0.70) mm。

2017 年, 由美国 Neocis 公司制造的名为 Yomi 的牙科种植导航机器人系统^[53] 获得 FDA 批准, 该系统由触觉式导航技术操控, 以提供钻头位置、方向和深度的物理参数, 并可以限制钻针的方向和深度 (如图 17)。Yomi 机器人使手术部位可视化, 并使医生能够根据术中的具体情况实时更改种植方案。2021 年, Bolding S L 等^[53] 使用 Yomi 机器人在临床上进行了 5 个病人共计 38 个植体的植入手术。结果显示角度偏差为 $(2.56^\circ \pm 1.48^\circ)$, 肩部偏差为 (1.04 ± 0.70) mm, 根部偏差为 (0.95 ± 0.73) mm, 深度偏差为 (0.42 ± 0.46) mm。

从 2013 年开始, 为了临床应用的目的, 赵铤民教授的团队^[54-55] 开发了一个高度自主化的种植牙机器人系统 (如图 18)。该系统由高精

度 UR5 机械臂、FusionTrack 250 光学追踪系统、Gamma 六轴力 / 力矩传感器、计算机等硬件系统和基于应用程序开发框架 Qt 和可视化工具包开发的软件控制系统构成。口腔种植机器人能够在医生的监督下, 按照规划好的种植方案根据医生指令自主完成种植窝洞的制备和种植体的植入, 且种植精度高于传统自由手种植、导板引导种植或导航引导种植的手术方式, 保证了术后修复效果和种植体的远期成功率。在视觉伺服和力伺服的混合控制下, 机器人末端执行器能够进行精准运动, 补偿末端执行器由于受力时发生形变而导致的系统误差, 使机器人在种植过程中能够具有“医生手感”。机器人具有随动功能, 能够实时跟踪患者局麻状态下颌骨的非自主震颤, 保证种植体植入的精度和患者的安全。该团队使用种植牙机器人系统进行了动物实验^[56], 受试动物为 9 只 3 岁中华田园犬, 结果显示总体精度: 颈部偏差为 (0.269 ± 0.152) mm, 根部偏差为 (0.254 ± 0.218) mm, 角度偏差为



图 17 Yomi 牙科种植导航机器人系统^[53]

Figure 17 Yomi dental implant navigation robotic system

($0.989^{\circ} \pm 0.517^{\circ}$)。2017 年 9 月，进行了 3 例缺牙患者的自主式口腔种植机器人手术，并顺利完成缺失牙的即刻修复。

对于严重萎缩的上颌骨，颧骨种植已经成为越来越流行的修复方式。然而，颧骨种植难度大，手术复杂，准确性在很大程度上取决于

外科医生的经验。为了克服传统手术导航系统的缺点，2019 年，Cao Z G 等^[57]设计并研制了一种 6 个自由度新型颧骨种植机器人系统（如图 19）。体外实验显示该机器人系统的角度、入口点和出口点偏差分别为 ($1.52^{\circ} \pm 0.58^{\circ}$)、(0.79 ± 0.19) mm 和 (1.49 ± 0.48) mm。同时，将机器人操作与人工操作进行了比较，结果表明，利用该系统进行颧骨种植体植入可以提高手术的准确性。

3 小结

医疗机器人的优点是手术精度高、稳定性好、智能化、标准化，可实现远程手术。随着医学机器人在口腔领域中的不断发展，必将推进整个口腔医学行业的标准化、规范化、精确化、智能化进程。除了上述口腔机器人外，还有口腔教学机器人^[58]，刷牙机器人^[59]，模拟牙科患者机器人系统^[60]等。虽然目前在口腔医学领域对机器人的研究取得了较大的进展，但还远不

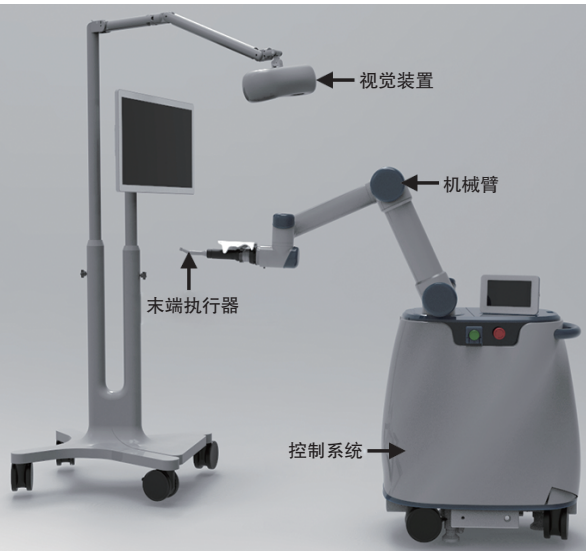


图 18 自主式种植机器人系统^[54-55]
Figure 18 Autonomous dental implant robotic system

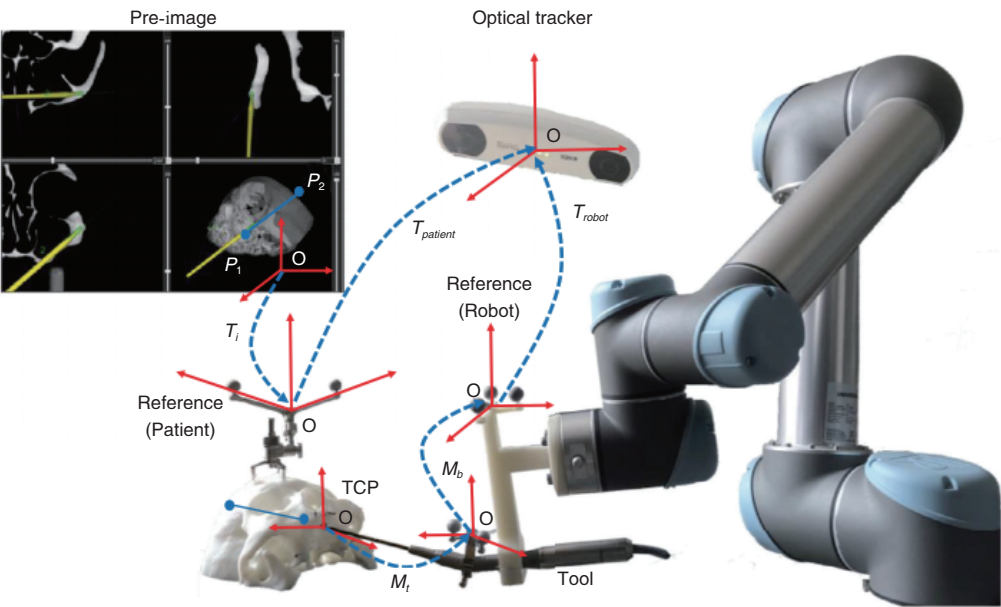


图 19 颧骨种植机器人^[58]
Figure 19 Cheekbone planting robot

够完善,存在很多缺点:如缺乏充分的人机交互,智能化水平不足以完全解放临床医生,手术器械作用力的感知和控制系统需要建立等。然而,随着人工智能技术、纳米机器人技术和机器人控制理论的不断发展和完善,上述问题将在未来得到解决。这意味着机器人将在口腔医学领域得到更广泛的应用,并将为人类口腔健康做出巨大的贡献。

参考文献

- [1] Forlizzi J, DiSalvo C. Service robots in the domestic environment: a study of the roomba vacuum in the home. In: Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on human-robot interaction[M]. Salt Lake City, Utah, USA: ACM, 2006: 258–265.
- [2] Jiahai C, You L, Jianping G, et al. Application of da Vinci surgical robotic system in hepatobiliary surgery[J]. *Int J Surg Med*, 2018, 4(1): 22–27.
- [3] Li Q H, Zamorano L, Pandya A, et al. The application accuracy of the NeuroMate robot-A quantitative comparison with frameless and frame-based surgical localization systems[J]. *Comput Aided Surg*, 2002, 7(2): 90–98.
- [4] Minchev G, Kronreif G, Ptacek W, et al. A novel robot-guided minimally invasive technique for brain tumor biopsies[J]. *J Neurosurg*, 2019. DOI: 10.3171/2018.8.JNS182096.
- [5] Fiani B, Quadri S A, Farooqui M, et al. Impact of robot-assisted spine surgery on health care quality and neurosurgical economics: a systemic review[J]. *Neurosurg Rev*, 2020, 43(1): 17–25.
- [6] Keric N, Doenitz C, Haj A, et al. Evaluation of robot-guided minimally invasive implantation of 2067 pedicle screws[J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 42(5): E11.
- [7] Barber S M, Teh B S, Baskin D S. Fractionated stereotactic radiotherapy for pituitary adenomas: single-center experience in 75 consecutive patients[J]. *Neurosurgery*, 2016, 79(3): 406–417.
- [8] Puataweepong P, Dhanachai M, Hansasuta A, et al. The clinical outcome of hypofractionated stereotactic radiotherapy with cyberknife robotic radiosurgery for peripituitary adenoma[J]. *Technol Cancer Res Treat*, 2016, 15(6): NP10–NP15.
- [9] Puataweepong P, Dhanachai M, Hansasuta A, et al. Clinical outcomes of peripituitary tumors treated with hypofractionated stereotactic radiotherapy using CyberKnife® stereotactic radiosurgery[J]. *J Neurooncol*, 2018, 139(3): 679–688.
- [10] Štádlér P, Dvořáček L, Vitásek P, et al. The application of robotic surgery in vascular medicine[J]. *Innovations (Phila)*, 2012, 7(4): 247–253.
- [11] Lin J C, Reddy D J, Eun D, et al. Robotic-assisted laparoscopic dissection of the infrarenal aorta and iliac artery: a technical description and early results[J]. *Ann Vasc Surg*, 2009, 23(3): 298–302.
- [12] Kettenbach J, Kronreif G. Robotic systems for percutaneous needle-guided interventions[J]. *Minim Invasive Ther Allied Technol*, 2015, 24(1): 45–53.
- [13] FU Y, LIU H, HUANG W, et al. Steerable catheters in minimally invasive vascular surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2009, 5(4): 381–391.
- [14] Bismuth J, Duran C, Stankovic M, et al. A first-in-man study of the role of flexible robotics in overcoming navigation challenges in the iliofemoral arteries[J]. *J Vasc Surg*, 2013, 57(2 Suppl): 14S–19S.
- [15] Giedelman C A, Abdul-Muhsin H, Schatloff O, et al. The impact of robotic surgery in urology[J]. *Actas Urol Esp*, 2013, 37(10): 652–657.
- [16] Coronado P J, Herraiz M A, Magrina J F, et al. Comparison of perioperative outcomes and cost of robotic-assisted laparoscopy, laparoscopy and laparotomy for endometrial cancer[J]. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol*, 2012, 165(2): 289–294.
- [17] Martin R F. Robotic surgery[J]. *Surg Clin North Am*, 2020, 100(2): xiii–xiv.
- [18] Challacombe B J, Khan M S, Murphy D, et al. The history of robotics in urology[J]. *World J Urol*, 2006, 24(2): 120–127.
- [19] WANG Y, ZHAO X, SONG Y, et al. A systematic review and meta-analysis of robot-assisted versus laparoscopically assisted gastrectomy for gastric cancer[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2017, 96(48): e8797.

- [20] van Boxel G I, Ruurda J P, van Hillegersberg R. Robotic-assisted gastrectomy for gastric cancer: a European perspective[J]. *Gastric Cancer*, 2019, 22(5): 909–919.
- [21] Choi J E, You J H, Kim D K, et al. Comparison of perioperative outcomes between robotic and laparoscopic partial nephrectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur Urol*, 2015, 67(5): 891–901.
- [22] Dagnino G, Georgilas I, Köhler P, et al. Navigation system for robot-assisted intra-articular lower-limb fracture surgery[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(10): 1831–1843.
- [23] Schneider J, Kalender W. Geometric accuracy in robot-assisted total hip replacement surgery[J]. *Comput Aided Surg*, 2003, 8(3): 135–145.
- [24] DU W, SUN T, DING Y, et al. Robot-assisted treatment of unstable pelvic fractures with a percutaneous iliac lumbar double rod fixation combined with a percutaneous pelvic anterior ring INFIX fixation[J]. *Int Orthop*, 2020, 44(6): 1223–1232.
- [25] ZHAO J X, LI C, REN H, et al. Evolution and current applications of robot-assisted fracture reduction: a comprehensive review[J]. *Ann Biomed Eng*, 2020, 48(1): 203–224.
- [26] 吕培军, 王勇, 李国珍, 等. 机器人辅助全口义齿排牙系统的初步研究 [J]. *中华口腔医学杂志*, 2001, 36(2): 139–142.
- [27] ZHANG Y D, JIN G J, LV P J, et al. Study on the multi-manipulator tooth-arrangement robot for complete denture manufacturing[J]. *Industrial Robot: an International Journal*, 2011, 38(1): 20–26.
- [28] WANG D X, WANG L, ZHANG Y R, et al. Preliminary study on a miniature laser manipulation robotic device for tooth crown preparation[J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2014. DOI: 10.1002/rcs.1560.
- [29] Werner B, Friedrich R, Rüdger R, et al. Robot and method for bending orthodontic archwires and other medical devices[P]. Patent No: US8082769, 2011–12–27.
- [30] 张永德, 蒋济雄. 正畸弓丝弯制特性分析及实验研究 [J]. *中国机械工程*, 2011, 22(15): 1827–1831.
- [31] 杜海艳, 贾裕祥, 张永德, 等. 弓丝弯制机器人运动轨迹规划 [J]. *中国机械工*, 2010, 21(13): 1605–1608.
- [32] Gilbert A. Robot for the elaboration of lingual archwires. Patent No: US D688, 803 S, 2013.
- [33] 蒋济雄. 口腔正畸弓丝成形规划及弯制机器人研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [34] XIA Z Y, GUO Y C, GAN Y Z, et al. Robot and manipulator for orthodontic appliances. Patent No: CN 103817691 A, 2014.
- [35] 郭杨超. 正畸弓丝弯制机器人末端执行器设计及轨迹规划的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [36] Dong J, Hong S Y. Design of Z Axis actuator and quick tool change assembly for an endodontic micro robot. Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition[C]. Canada: ASME, 2010.
- [37] Ortiz Simon J L, Martinez A M, Espinoza D L, et al. Mechatronic assistant system for dental drill handling[J]. *Int J Med Robot*, 2011, 7(1): 22–26.
- [38] Nelson C A, Hossain S G, Al-Okaily A, et al. A novel vending machine for supplying root canal tools during surgery[J]. *J Med Eng Technol*, 2012, 36: 102–116.
- [39] Burgner J, Müller M, Raczkowsky J, et al. Ex vivo accuracy evaluation for robot assisted laser bone ablation[J]. *Int J Med Robot*, 2010, 6: 489–500.
- [40] GUI H, ZHANG S, LUAN N, et al. A novel system for navigation-and robot-assisted craniofacial surgery: establishment of the principle prototype[J]. *J Craniofac Surg*, 2015, 26: 746–749.
- [41] Baek K W, Deibel W, Marinov D, et al. Clinical applicability of robot-guided contact-free laser osteotomy in cranio-maxillo-facial surgery: in-vitro simulation and in-vivo surgery in minipig mandibles[J]. *Br J Oral Maxillofac Surg*, 2015, 53(10): 976–981.
- [42] Ma Q, Kobayashi E, Wang J, et al. Development and preliminary evaluation of an autonomous surgical system for oral and maxillofacial surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2019, 15(4): e1997.
- [43] Khan K, Dobbs T, Swan M C, et al. Trans-oral robotic cleft surgery (TORCS) for palate and posterior pharyngeal wall reconstruction: a feasibility study[J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 2016, 69: 97–100.

- [44] Nadjmi N. Transoral robotic cleft palate surgery[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2016, 53: 326–331.
- [45] Kayhan F T, Kaya H, Yazici Z M. Transoral robotic surgery for tonguebase adenoid cystic carcinoma[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2011, 69: 2904–2908.
- [46] Arshad H, Durmus K, Ozer E. Transoral robotic resection of selected parapharyngeal space tumors[J]. Eur Arch Otorhinolaryngol, 2013, 270: 1737–1740.
- [47] Mendelsohn A H. Transoral robotic assisted resection of the parapharyngeal space[J]. Head Neck, 2015, 37: 273–280.
- [48] Ansarin M, Tagliabue M, Chu F, et al. Transoral robotic surgery in retrostyloid parapharyngeal space schwannomas[J]. Case Rep Otolaryngol, 2014, 2014: 296025.
- [49] Arijji Y, Kat Sumata A, Ogi N, et al. An oral rehabilitation robot for massaging the masseter and temporal muscles: a preliminary report[J]. Oral Radiology, 2009, 25(1): 53–59.
- [50] Takanobu H, Ohtsuki K, Takanishi A, et al. Jaw training robot and its clinical results[C]. IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE 2003, 2: 932–937.
- [51] Sun Y, Lim C M, Tan H H, et al. Soft oral interventional rehabilitation robot based on low-profile soft pneumatic actuator[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE 2015; 2907–2912.
- [52] Sun X, McKenzie F D, Bawab S, et al. Automated dental implantation using image-guided robotics: registration results[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2011, 6: 627–634.
- [53] Bolding S L, Reebye U N. Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches[J]. J Prosthet Dent, 2021 Mar; 4: S0022–3913(21)00056–1.
- [54] 吴秦. 口腔种植机器人空间映射装置的研发及其应用研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2016.
- [55] 谢瑞. 口腔种植机器人系统精度的相关研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2016.
- [56] 白石柱, 任楠, 赵铤民, 等. 自主式口腔种植机器人手术系统动物体内种植精度的研究[J]. 中华口腔医学杂志, 2021, 56(2): 170–174.
- [57] CAO Z G, QIN C X, FAN S C, et al. Pilot study of a surgical robot system for zygomatic implant placement[J]. Med Eng Phys, 2020. DOI: 10.1016/j.medengphys. 2019.07.020.
- [58] Murbay S, Neelakantan P, Chang JWW, et al. Evaluation of the introduction of a dental virtual simulator on the performance of undergraduate dental students in the pre-clinical operative dentistry course[J]. Eur J Dent Educ, 2020, 24(1): 5–16.
- [59] Lang T, Staufer S, Jennes B, et al. Clinical validation of robot simulation of toothbrushing-comparative plaque removal efficacy[J]. BMC Oral Health, 2014, 14: 82.
- [60] Tanzawa T, Futaki K, Kurabayashi H, et al. Medical emergency education using a robot patient in a dental setting[J]. Eur J Dent Educ, 2013, 17(1): e114–119.

郑 重 声 明

目前有不法分子利用虚假非法网站借本刊编辑部名义进行诈骗活动, 发送组稿、录用通知和期刊订阅等信息, 请各位作者认清本刊唯一官方网站 <https://www.jqrwxzz.com>, 以避免给您造成不必要的麻烦。本刊对录用论文免费快速发表! 编辑部邮箱: jqrwxzz@163.com; 咨询电话: 029–87286478。

本刊编辑部