

机器人在骨科应用相关研究的国际现状与趋势分析

宋涯含¹ 晁洪露² 田华³ 窦豆⁴ 赵旻暉³

【摘要】 目的 探讨机器人在骨科领域应用的全球研究热点和趋势。方法 通过 Web of Science 的“科学引文索引扩展数据库”检索 2022 年 04 月前关于机器人在骨科应用的文献,用文献计量学方法对来源数据进行统计及分析。使用 Citespace 软件进行共现分析等可视化转化,分析机器人在骨科应用的研究现状及趋势。**结果** 共检索出 1 051 篇文献,清理数据后纳入 1 080 篇。机器人在骨科应用的全球研究发文量逐年增加,2019 年后增长尤为明显。其中美国发文量达 525 篇,数量上对全球的研究贡献最大,且论文总被引频次(37.44)及 H 指数(69)均最高。中国发文量(76 篇)排在第三位,总被引频次(8.83)及 H 指数(12),排在第 7 位。“AMERICAN JOURNAL OF SPORTS MEDICINE”、“KNEE SURGERY TRAUMATOLOGY ARTHROSCOPY”和“JOURNAL OF ARTHROPLASTY”杂志刊出的相关论文总量最多。匹兹堡大学、特种外科医院和哈佛大学是发文量贡献最大前三位的机构。机器人在骨科应用的研究主题主要有:前交叉韧带重建原位力学测量、关节置换辅助、手术精准性和康复功能锻炼。其中关节置换辅助和手术精准性为近年研究的主要领域。**结论** 机器人在骨科领域中的应用不断深化和发展,研究成果逐年增加,目前美国仍是其中最大贡献者,我国既往对该领域关注、投入略有不足,近年有追赶趋势。机器人辅助骨科实现个体化、精准化的治疗,有可能成为下一阶段研究的关注点。

【关键词】 骨科; 机器人; 应用现状; 可视化分析

Global status and research trend of robot application in orthopedics by bibliometric analysis Song Yahan¹, Chao Honglu², Tian Hua³, Dou Dou³, Zhao Minwei¹. ¹Department of Library, Peking university 3rd hospital, Beijing 100191, China; ²Department of Neurosurgery, The 1st affiliated hospital with Njing medical university, Nanjing 210029, China; ³Department of Orthopedics, Peking university 3rd hospital, Beijing 100191, China; ⁴National Natural Science Foundation of China, Beijing 100083, China

Corresponding author: Zhao Minwei, Email: 18611165078@163.com

【Abstract】 **Objective** To analysis the global research hotspot and trend of robot application in orthopedics. **Methods** The literatures on the application of robots in orthopedics before April 2022 were searched through the "extended database of Science Citation Index" of wed of science, and the source data were counted and analyzed by bibliometric method. Use CiteSpace software to carry out visual transformation such as literature coupling analysis and co-occurrence analysis, to analyze the research status and trend of robot application in orthopedics. **Results** A total of 1051 literatures were retrieved and 1080 were included after data cleaning. The number of global research papers on the application of robots in orthopedics has increased year by year, especially after 2019. Among them, 525 papers were published in the United States, which made the largest contribution to global research in terms of quantity, and the total citation frequency (37.44) and h index (69) were the highest. The number of articles published in China (76 articles) ranked third, and the total citation frequency (8.83) and h index (12) placed seventh. "American Journal of sports medicine", "knee surge tourism arthroscope" and "Journal of arthroplasty" published the most relevant papers. University of Pittsburgh, Special Surgery Hospital and Harvard University are the top three institutions

DOI: 10.3877/cma.j.issn.2096-0263.2023.01.011

基金项目: 北大医学青年科技创新培育基金(BMU2021PYB034)

作者单位: 100191 北京大学第三医院图书馆¹; 210029 南京医科大学第一附属医院神经外科²; 100191 北京大学第三医院骨科³; 100083 北京, 国家自然科学基金委员会医学科学部⁴

通信作者: 赵旻暉, Email: 18611165078@163.com

that contributed the most volume of papers. The research topics of robot application in orthopedics mainly include: in situ mechanical measurement of anterior cruciate ligament reconstruction, joint replacement assistance, surgical accuracy and functional rehabilitation. Joint replacement assistance and surgical accuracy are the main research fields in recent years. **Conclusion** The application of robots in orthopedics is deepening, and the researches are increasing year by year. At present, the United States is still the largest contributor. China paid little attention and investment in this field in the past, and has a catch-up trend in recent years. Robot assisted orthopedics to achieve individualized and accurate treatment may become the future focus in the next stage.

【Key words】 Orthopedics; Robot; Application status; Bibliometric analysis

近30年来伴随计算机、影像学等发展,机器人辅助外科从实验性尝试,逐步走向临床,是医学领域中发展最为迅速的一个领域^[1]。多个专业都发展着各自越来越专业化的机器人辅助技术^[2],比如普外科 da Vinci 腹腔镜手术辅助系统、神经外科 neuromate 手术辅助系统等。

在骨科领域,不断进展成熟的机器人辅助技术提供了实现个体术前规划的可能,并在手术过程中通过实时反馈等方法提高植入物位置的准确性^[3]。例如在前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)重建手术中,由于ACL的股骨附着体更接近膝关节的旋转中心,微小的误差都可能对膝关节运动学产生关键影响^[4],机器人辅助有助于解决这一难题。在关节置换手术中,机器人辅助手术的最新专利比目前外科绝大多数其他领域都要多,突显了学界的巨大兴趣和资源分配。

随着近30年间机器人在骨科应用中的快速发展,十分有必要对相关的论文、期刊、发文所在机构、国际合作程度、科研资助等情况,进行系统性分析回顾。同时还需要了解该领域卓有成效的贡献者、关键主题和高频率的关键词,以掌握相关领域知识发展的新趋势。然而,目前尚未见到对该领域论文成果的系统性分析。文献计量分析已被广泛用于定量评估文献,可协助探明研究领域的热点和发展趋势。因此,为了更好地了解机器人在骨科应用中的现状和趋势,本文利用WOS检索的相关文献信息,通过文献计量学方法并利用Citespace软件综合分析^[5-6],将文献可视化,使其具有生动的信息。希望借此可以帮助临床医生、科研人员、研发机构等,迅速而准确地分类和了解这一领域,总结过去骨科机器人发展历程,并指导未来的研究方向。

数据与方法

一、数据

选取Wed of Science 核心合集和Journal Citation Reports (JCR)数据库,检索时间为2022年3月11日。检索JCR数据库 Science Citation Index Expanded (SCIE)中 Categories=Orthopedics 期刊,共82种。SCIE收录自然科学期刊质量高,且学科划分标准统一,能够准确反映领域内研究现状,因此以82种骨科期刊收录文献为基础。检索式为TS=robot* AND (SO=(AMERICAN JOURNAL OF SPORTS MEDICINE) OR SO=(OSTEOARTHRITIS AND CARTILAGE)等82种骨

科学期刊),不限定时间和文献类型,共检出1 051 篇文献,骨科临床医生对数据进行筛选,排除了内容重复、主题不相关的文献,最终得到1 080 篇。

二、方法

将1080 篇文献的“全记录与引用的参考文献”以txt格式导入Citespace (Version 5.8r2)进行分析。其中主要针对机器人在骨科应用的相关文献的年代、期刊、作者、国家,及关键词等信息进行分析,其中利用Microsoft Excel 2016 软件分析文献年代、期刊,同时利用Citespace 软件对作者、机构、国家分布及合作情况,关键词等进行系统分析,并绘制可视化图谱,有助于科研人员能够直观的了解该领域的研究方向和热点。

利用Citespace 对关键词进行timeline 聚类展示,国家/地区和研究机构合作网络分析,并利用Citespace 的burst keywords 检索功能,对突发性热点词汇进行统计,并对其中部分keyword 进行进一步展示分析。

结 果

一、发表文献量与领域期刊分析

统计1 080 篇文献的发表年代(图1),机器人在骨科应用的论文数量在近30年间呈指数级的增长,1988年至1999年每年发表论文数少于10篇,2008年后每年发文量爆发式的增长,自2015年稳步增长,其中2009年开始至今论文数量增长速度较快。2021年该研究领域共发表论文153篇。

统计分析1 080 篇文献分布在65种期刊上,占82种骨科期刊的79.3%。发表论文最多的前10种期刊该研究领域总发表量的56.4%。在10家出版商中,其中7家来自美国(USA),其余3家出版商位于德国、英国和荷兰(图2)。其中557篇(56.1%)文献发表在Q1区期刊,机器人在骨科应用的文献质量较高。AMERICAN JOURNAL OF SPORTS MEDICINE、KNEE SURGERY TRAUMATOLOGY ARTHROSCOPY 和 JOURNAL OF ARTHROPLASTY 是发文前三位期刊,表明资深骨科期刊对机器人在骨科领域的应用,投入了持续的关注。

二、国家、科研机构以及资助机构分布分析

发文量较多的科研机构有Univ Pittsburgh (匹兹堡大学), Hosp Special Surg (纽约特种外科医院), Harvard Univ (哈佛大学医学院), Hannover Med Sch (汉诺威医学院), Cleveland Clin (克利夫兰诊所)等顶级研究机构。科研机构

发表论文数量可代表其在领域的研究能力。机构合作网络图谱分析显示各科研机构之间合作较多(图3),跨地域、跨机构合作可促进该领域的深入研究。表中所示机构合作密切,而有相当多的机构节点没有与其他任何节点联系。

统计的文献中共涉及48个国家或地区,按发文量列出排名前10位的国家,比较这些国家的发表论文章数、h指数和篇均被引频次,以考察和分析这些国家在骨科机器人研究中的科研实力、国际影响力(表1)。绘制国家合作图谱(图4),可以看出中国与多国之间建立了国际合作,总体上与美国合作最多,依次是德国、英国、法国、韩国、日本。

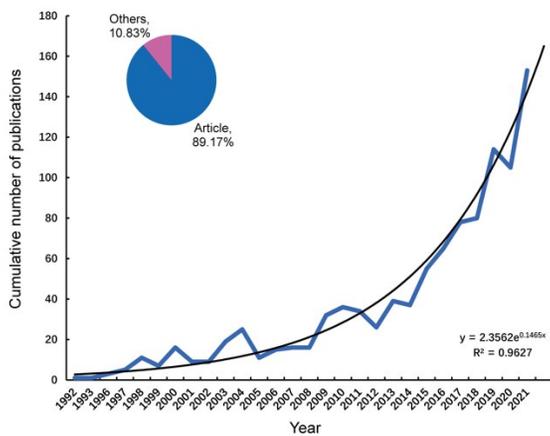
在论文资助机构分析上(图5),其中177篇论文受到了美国国立卫生研究院(National Institutes of Health, NIH)资助,20篇受到了国家自然科学基金委员会(National Natural Science Foundation of China, NSFC)资助,几家医疗器械公司对论文成果也提供较多资助,例如Smith Nephew、Arthrex,分别资助了27、28篇论文。部分论文成果受到了多方资助。

三、关键词共现(Co-Occurrence)和突发性关键词分析
通过抓取1080篇文献,共获取4127个关键词。关键词

表1 国家发文量统计及评价

国家/地区	发文量	h-index	篇均被引
美国	525	69	37.44
德国	148	33	27.72
中国	76	12	8.83
英国	70	21	18.81
日本	64	20	18.78
法国	39	14	20.38
韩国	39	21	30.18
加拿大	34	14	22.68
瑞士	25	12	16.32
澳大利亚	24	10	14.92

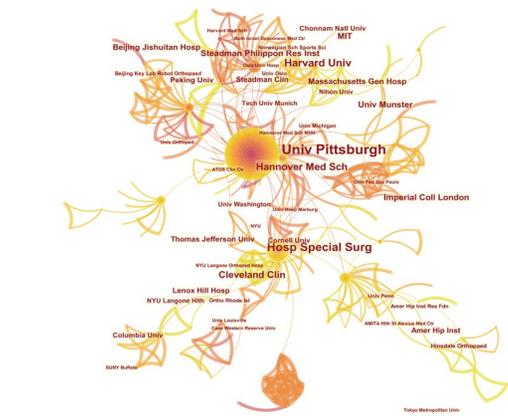
的准确性和频次是影响共现方法识别领域研究热点结果准确性的两个重要因素。为使分析结果更准确,先对文献中的关键词进行清洗整理,主要包括对词的大小写及单复数,全称与缩写及同义词进行统一。通过Citespace建立共词矩阵



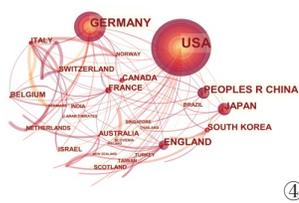
①



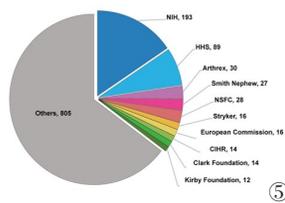
②



③



④



⑤

图1 从1992到2021,关于机器人在骨科中的应用的出版物数量,并建立了时间趋势引用曲线,左上角的饼图显示了所有论文中的文章比例 图2 与机器人在骨科应用相关且发文量排名前24位的期刊名称及其所在国 图3 骨科机器人研究机构网络图 图4 从事骨科机器人研究的国家/地区网络图 图5 资助机器人在骨科应用的十大机构

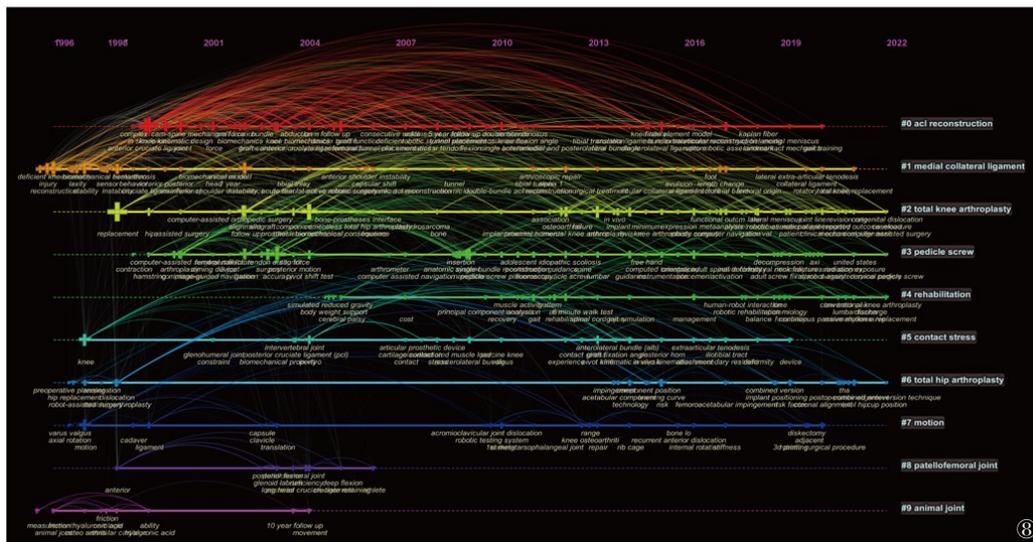
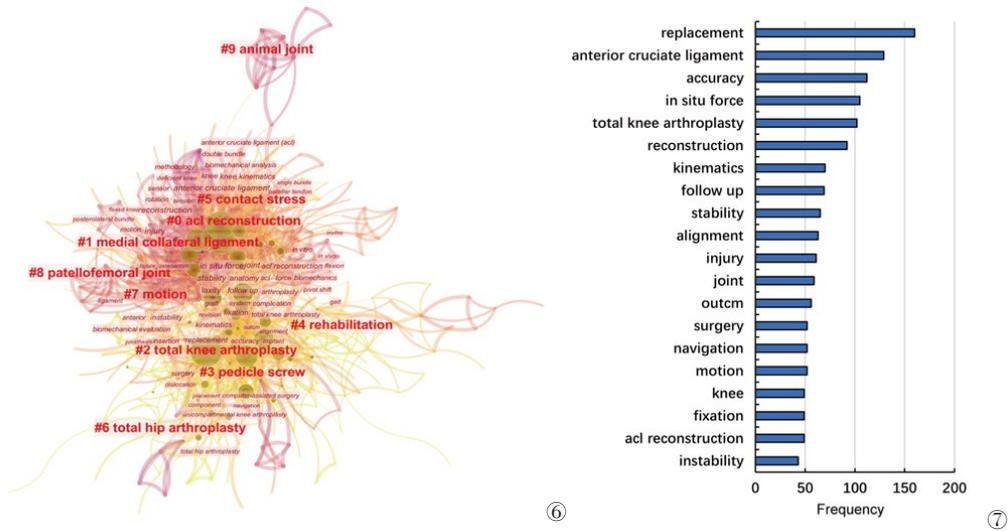


图6 骨科机器人研究中关键词协同出现的网络图 图7 骨科机器人研究相关的前20个高频关键词和中心度 图8 与机器人在骨科中应用相关的共引文献时间轴视图。具有较大节点的集群包含了更多的出版物,这表明该集群问题是本领域关注的热点

并绘制关键词共现网络图谱(图6~8)。

使用 Citespace 软件分析关键词,出现频次最大的前5个关键词是: replacement(160), anterior cruciate ligament(129), accuracy(112), in situ force(105), total knee arthroplasty(102)(图7)。通过 Citespace 的聚类分析,将关键词分为七个主要簇(clusters): ACL reconstruction(前十字韧带重建术)、medial collateral ligament(内侧副韧带)、total knee arthroplasty(TKA,全膝关节置换)、pedicle screw(椎弓根螺钉)、rehabilitation(康复)、contact stress(接触应力)、total hip arthroplasty(全髋关节置换术)、motion(运动)、patellofemoral joint(髌股关节)以及 animal joint(动物关节),在骨科中机器人应用研究也主要集中在以上几个大方面(图6)。

对该领域突发热点关键词进行统计,关注了前25个关键词(图9)。通过其中研究热点及演变我们发现,2010~2012年的研究主要集中在康复和前交叉韧带移植

物的力学评测方面,自2014年开始手术辅助机器人相关研究大量兴起,包括:脊柱椎弓根钉植入、膝髌关节置换辅助等,移植物离体评测(vitro robotic assessment)是2017~18年后在前交叉韧带重建领域的又一研究热点。其中准确性(accuracy)的相关论文在2018年~2021年间呈爆发式增长(图9),其中被引用次数较多的是 Babar Kayani 在2019年报道的机器人辅助TKA技术对植入物准确性影响的研究(图10)^[7],这一爆发式增长和机器人在TKA手术中成熟应用以及病例积累有很大关系。导航机器人在椎弓根螺钉植入(Pedicle screw placement)应用也越来越成熟,尤其近3年相关论文成果爆发式增加,被引用最多的是2010年 Dennis Devito 在《Spine》发表的成果(图11),研究通过长时间、大量病例系统验证了脊柱手术辅助机器人(Spine Assist Surgical Robot)为螺钉植入提供了更好的准确性和更低的神经损伤风险^[8]。

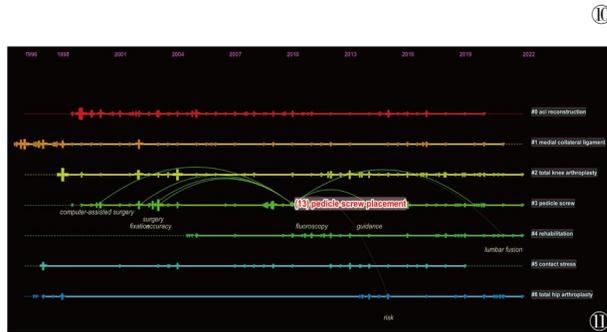
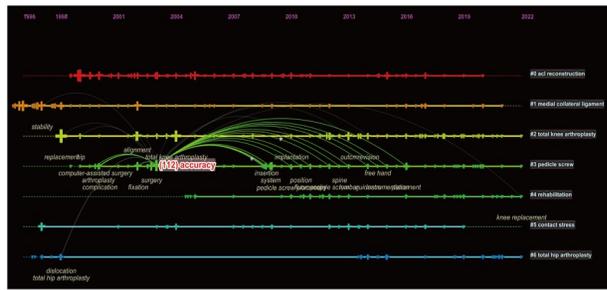
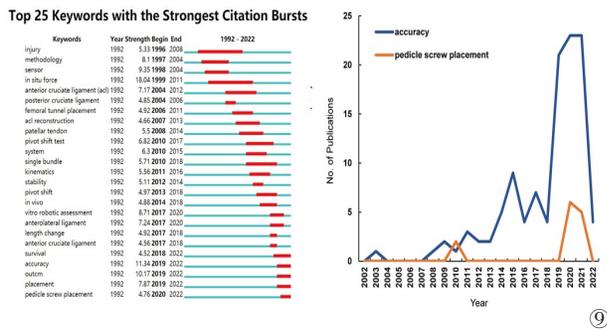


图9 本领域前25个突发热点关键词 图10 从2002年到2022年,高频引用关键词的数量变化 图11 引文爆发最强的关键词分析,关于“准确性”和“椎弓根螺钉放置”的出版物参考文献共引图(时间轴视图)

讨 论

机器人在骨科领域的应用是当下多学科交叉的最好体现,随着机械制造技术的不断发展,其在灵活性、精确性、稳定性和智能化等方面均取得了长足的进步^[9]。自上世纪80年代机器人技术融入医疗领域后,近三十年取得了显著的发展,已展示出巨大的临床应用潜力和商业价值^[10]。Li等^[11]对骨科机器人在临床手术中的应用进行了文献计量学研究,分析了现状及未来发展,本文旨在探讨机器人在骨科应用的整体情况及趋势。

一、国内外研究现状

本文统计分析2022年3月前发表的文献,共1 080篇,分布在65种期刊上,占82种骨科期刊的79.3%。2000年之前,年发表文献量较少,本世纪初始10年,文献发表量波动上升。2010年本领域相关文献发表量进入快速增长期,2019~2020年活跃度达到顶峰,该时期发表的240篇文献,共占纳入总量的24.2%。不论从文献发表量,还是刊载的期刊,亦

或是工作突出的中心,美国无疑是该领域的领先者。美国的论文数量、h指数、篇均被引频次以及合作国数量相比其他国家有明显的优势,可见其雄厚的科研实力及在本领域较高的科研投入。中国发文量排名第三,英国、日本的发文量稍低于中国,但篇均被引频次和h指数都远高于中国,说明了我国论文在质量上还有待提高,应引起国内研究者的重视。另外,在科研基金支持层面,根据我国国家自然科学基金委(National Natural Science Foundation of China, NSFC)的数据,自1998年至今,NSFC共收到机器人相关研究项目417项,资助42项,资助率为10.07%,机器人在医学基础研究领域的申请与资助情况,尚属于一个起步阶段。从过去十年的数据分析,因机器人与骨科相关的基础研究申请量不多,故NSFC对该领域的资助也较少^[12]。

依据Citespace对关键词进行统计,可以看出机器人在骨科领域的应用,主要集中在关节置换、手术准确性、术后康复和移植生物力学评测等几个方面。机器人在神经系统疾病患者的辅助康复方面,起到了重要的作用,可穿戴的机器人辅助康复设备,是新近的研究热点^[2]。对于韧带移植物的生物力学评测^[13-14],机器人的引入也取得了值得肯定的成绩^[15]。肌骨系统的生物医学工程是我国骨科未来研究的重点之一^[16],有理由相信机器人技术的交叉会进一步提升该类研究的整体水平。

二、骨科机器人技术的发展趋势

机器人辅助手术正在彻底地改变骨科领域的面貌。机器人最初被引入骨科手术,是以提高精确度、准确性以及患者的总体结果和满意度为目的。目前,手术机器人显著改善了骨科手术创伤大、辐射量高、操作不稳定等问题,其本体构型也从早期的基于工业化状态逐步演变为医疗专用机型,智能化程度不断提高^[17]。

在关节外科领域,机器人辅助是新晋关注的研究方向(2015~2019),膝、髋关节置换是机器人主要辅助的手术^[18]。其手术辅助机器人可大致分为主动型、半主动型和被动型三类^[9],主动型可按照术前计划,由机器人主动完成部分手术操作;半主动型则需要在医生的控制下进行手术,但同时医生的操作也会同时受到机器的约束,以增加安全性;被动型,医生具有完全的自主控制权,机器人本身不进行手术操作,只提供定位、导向、导航等功能。随着人工智能技术的不断发展,个体化、精准术前规划将得到进一步的推广与普及,例如:符合脊柱-骨盆-下肢联动需求的全髋关节置换术,以及运动学膝关节置换手术等,均有望通过机器人的精确辅助得以实施。在手术精准性方面,机器人辅助手术重点关注如何提高脊柱手术中椎弓根螺钉植入的精准度,减少血管和神经损伤、减少辐射暴露等^[20]。目前,我国骨科手术机器人的研发取得了一定成绩,已有产品取得国内医疗器械注册证;在应用方面,国产骨科手术机器人取得了满意的临床结果^[21],同时也获得了多项核心专利技术,基本实现了设计-研发-制造全产业链条的构建,由此可见,骨科机器人技术是未来我国骨科的发展方向^[22]。

综上所述,可预见骨科机器人研究将进入快速增长阶段,在今后研发中,精准医疗必将成为骨科机器人发展的主

要方向之一,与数字技术深度整合,为骨科疾病诊疗提供全新的微创化、个体化和智能化的新模式。

本文尚存在一些局限性:首先,本文没有对中文发表的期刊内容进行检索和收录;再者,本文检索策略以82种高质量骨科期刊为基础,检索式语义宽泛,且不限定时间和文献类型,虽初步结果需经高年资骨科医师人工筛选,但仍难免存在主观偏倚;最后,本年度(2022年)的数据尚不完整,或可根据指数趋势线进行预测,但有理由相信,骨科机器人应用的研究将持续受到关注,全球发文量将保持增长趋势。

参 考 文 献

- 1 Buckingham RA, Buckingham RO. Robots in operating theatres [J]. *BMJ*, 1995, 311(718): 1479-1482.
- 2 Trocraz J, Dagnino G, Yang GZ. Frontiers of medical robotics: from concept to systems to clinical translation [J]. *Annu Rev Biomed Eng*, 2019, 21: 193-218.
- 3 Roche M. The MAKO robotic- arm knee arthroplasty system [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12): 2043-2047.
- 4 Musahl V, Plakseychuk A, Fu FH. Current opinion on computer-aided surgical navigation and robotics:role in the treatment of sports-related injuries [J]. *Sports Med*, 2002, 32(13): 809-818.
- 5 Chen C, Song M. Visualizing a field of research:A methodology of systematic scientometric reviews [J]. *PLoS One*, 2019, 14(10): e0223994.
- 6 Van Eck NJ, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping [J]. *Scientometrics*, 2010, 84(2): 523-538.
- 7 Kayani B, Konan S, Pietrzak J, et al. Iatrogenic bone and Soft tissue trauma in Robotic- Arm assisted total knee arthroplasty compared with conventional Jig-Based total knee arthroplasty:a prospective cohort study and validation of a new classification system [J]. *J Arthroplasty*, 2018, 33(8): 2496-2501.
- 8 Devito DP, Kaplan L, Dietl R, et al. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot:retrospective study [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35(24): 2109-2115.
- 9 JE Lang, S Mannava, AJ Floyd, et al. (2011) Robotic systems in orthopaedic surgery. *The Journal of bone and joint surgery [J]. British volume* 93, 1296-1299
- 10 Leal GT, Campos CO. 30 years of robotic surgery [J]. *World J Surg*, 2016, 40(10): 2550-2557.
- 11 Li C, Wang L, Perka C, et al. Clinical application of robotic orthopedic surgery: a bibliometric study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 968.
- 12 Dou D. Applications and grants of National Natural Scientific Foundation of China's General Program in abnormalities and diseases of locomotor system:a ten-year review [J]. *Ann Transl Med*, 2020, 8(16): 1024.
- 13 Bertani R, Melegari C, De Cola MC, et al. Effects of robot-assisted upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review with meta-analysis [J]. *Neurol Sci*, 2017, 38(9): 1561-1569.
- 14 Nam KY, Kim HJ, Kwon BS, et al. Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in People with spinal cord injury:a systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1): 24.
- 15 Debandi A, Maeyama A, Lu S, et al. Biomechanical comparison of three anatomic ACL reconstructions in a porcine model [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2011, 19(5): 728-735.
- 16 Lin J, Chen L, Dou D. Progress of orthopaedic research in China over the last decade [J]. *J Orthop Translat*, 2020, 24: 131-137.
- 17 唐佩福, 张浩, 李建涛, 等. 外科4.0: 数字化智能化外科赋能时代的来临 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2019 (03): 185-188.
- 18 Innocenti B, Bori E. Robotics in orthopaedic surgery: why, what and how? [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12): 2035-2042.
- 19 Stulberg BN, Zadzilka JD. Active robotic technologies for total knee arthroplasty [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12): 2069-2075.
- 20 Lieberman IH, Kisinde S, Hesselbacher S. Robotic-Assisted pedicle screw placement during spine surgery [J]. *JBJS Essent Surg Tech*, 2020, 10(2): e0020.
- 21 茅剑平, 张琦, 范明星, 等. 机器人辅助与徒手置入椎弓根螺钉在经椎间孔腰椎椎间融合术中的对比研究 [J]. *中国微创外科杂志*, 2019, 19(06): 481-484+489.
- 22 田伟. 医用机器人的发展现状 [J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(05): 374-378.

(收稿日期:2022-07-24)

(本文编辑:吕红芝)

宋涯含, 晁洪露, 田华, 等. 机器人在骨科应用相关研究的国际现状与趋势分析 [J/CD]. *中华老年骨科与康复电子杂志*, 2023, 9(1): 59-64.