

计算机辅助骨科手术机器人技术发展及应用综述

张新星, 赵英杰, 陈超

(衢州职业技术学院 机电工程学院, 浙江 衢州 324000)

摘要: 肌肉骨骼系统在人体运动中起着至关重要的作用, 这个系统的疾病通常会导致严重的长期残疾, 是影响人类健康和活动能力的关键因素; 计算机辅助骨科手术机器人系统已成为临床骨科中最重要和最具挑战性的系统之一, 因为它们能够使用现代临床导航系统和机器人系统精确治疗肌肉骨骼疾病, 具有有效降低辐射、减少医生体力等优势, 成为解决传统骨科疾病的最佳选择之一; 通过对机器人在骨科手术中的应用分析, 重点介绍了骨科机器人的机构设计、导航技术、机器人控制、交互技术以及骨-机器人连接技术; 在导航技术中, 利用 CT 扫描设备获取图像和光学跟踪装置进行导航已成为主流; 在机器人控制和交互技术中, 既有遥操作, 也有自动控制; 借助文献梳理, 进一步讨论了目前计算机辅助骨科手术机器人系统存在的问题及其未来发展。

关键词: 计算机辅助; 骨科手术; 机器人技术; 导航系统; 图像配准

Review on the Development and Application of Computer Assisted Orthopedic Surgery Robots

ZHANG Xinxing, ZHAO Yingjie, CHEN Chao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technical, Quzhou 324000, China)

Abstract: The musculoskeletal system plays a crucial role in human movement, diseases of the system often lead to the severe long-term disability and are the key factors affecting the human health and mobility. Computer assisted orthopaedic surgery robot system has become the most important in clinical orthopaedics and one of the most challenging systems, because they can use the modern clinical navigation system and the robot system accurate treatment of musculoskeletal disease, can effectively reduce the radiation, decrease the advantages of doctor physical, It has become one of the best choices to solve the traditional orthopedic diseases. Through analyzing the application of robot in orthopedic surgery, the mechanism design, navigation technology, robot control, interaction technology and bone-robot connection technology of orthopedic robot are introduced emphatically. In navigation technology, CT scanning equipment is used to obtain the images and optical tracking devices for navigation, which has become the mainstream. In robot control and interaction technology, there are both the teleoperation and the automatic control. With the help of literature review, the existing problems and future developments of the computer-assisted orthopedic surgery robot system are further discussed.

Keywords: computer aided; orthopedic surgery; robotics; navigation system; image registration

0 引言

由于计算机、导航和机器人技术的创新, 计算机辅助机器人系统已被用于各种骨科手术, 包括关节成形术、脊柱手术、骨肿瘤手术、关节镜检查、骨折复位、创伤手术的骨折固定。以骨折手术为例, 在微创骨折复位过程中, 外科医生需要在术中透视的持续监测下手动操作骨折的骨头。受限于 C 型臂的视野, 骨折复位的效果主要取决于外科医生的技术和经验。骨折部位的不正确定位和对齐以及旋转不良常常导致术后并发症, 例如畸形愈合和骨不连。持续辐射是目前骨科创伤手术的一个前提条件, 但对医务人员会产生累积伤害。目前主要面临的挑战包括: 1) 骨折

的不可见性和复杂性; 2) 骨折复位精度更高, 术后功能更佳; 3) 适当的机器人自由度 (DOF) 提供足够的工作空间; 4) 下肢骨折复位时需要足够的机器人输出力。

为了实现提高精度、输出力和扩展工作空间的目的, 各种类型的机器人在过去几十年中得到了发展, 包括串行、并行和混合机器人机构。对于骨折手术, 另一个问题是骨折的不可见性。因此, 机器人在手术过程中需要知道或“看到”骨折的位置, 而这在传统手术中必须通过 X 射线来实现。计算机辅助导航系统可用作手术机器人的“眼睛”。在“导航系统”部分介绍了用作手术骨折复位的独立系统。在“机器人系统”部分, 介绍了当前不同类型的机器人,

收稿日期: 2022-02-19; 修回日期: 2022-02-28。

基金项目: 2021 年浙江省教育厅一般科研项目 (Y202148015); 2020 年衢州市科技计划竞争性项目 (2020K03)。

作者简介: 张新星 (1982-), 男, 浙江衢州人, 硕士, 副教授, 主要从事医疗机器人技术方向的研究。

引用格式: 张新星, 赵英杰, 陈超. 计算机辅助骨科手术机器人技术发展及应用综述[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 1-7, 13.

包括：1) 串行机器人机构，如单侧外固定器、牵引装置和串行机械臂；2) 并联机器人机构，如环形外固定架、牵引装置、并联机器人机械手；3) 混合机器人。在“结论”部分，总结了未来骨科手术发展方向和潜在应用。

1 国内外研究现状

骨科机器人骨外起步较早，美国、德国、日本都有比较成熟的产品。其中基于外部固定框架结构的复位机器人尤为典型，具有两个主要结构，一个是图 1 (a) 中的六自由度 (DOF) 外固定器，另一个是图 1 (b) 中的单侧固定器。在临床实践中，骨科医生通过使用外固定器结合 C 型臂提供的二维图像来操纵骨折部位，以重新排列近端和远端碎片。其中六自由度 (DOF) 机器人来源于 Stewart 平台 (一种并联机器人)。骨折复位机器人的研究经历了一个从简单外固定架演化为串并联混合式结构的渐变过程。2009 年，R. Ye 等人^[1-4]首先提出了一个六自由度串联—并联混合复位机器人 (名为 Dcros: 双笛卡尔机器人)，该机器人通过成对的执行器的线性运动获得所有末端执行器的旋转运动。与 Stewart 结构相比，该机器人具有更大的工作空间范围以及更简单的正向运动学和逆向运动学解决方案，如图 1 (a) 所示。2010 年，S. S. Hung 等人^[5]使用 C 形卡尺将串并联混合机器人固定在下肢骨折辅助手术的手术床上，该机器人可以分别控制近端和远端，如图 1 (b) 所示。2016 年，G. Dagnino 等人^[6-8]将 Stewart 平台连接到串行机械臂，并开发了用于关节骨折的复位机器人，与大多数骨折复位机器人相比，这是一个突破，可以减少患者的创伤以及对软组织，神经血管等的伤害。在动物骨骼实验中其准确性很高，可实现的负载力相对较小，这限制了它的实用性。

已进入临床应用基于外部固定框架结构的复位机器人如图 1 所示。而最为典型的应用是基于串并联混合结构的骨折复位机器人，还没有成熟的样机和商业化应用，如图 2 所示。

国内骨科机器人起步较晚，先后有哈工大、东南大学、浙江大学进行相关研究，其中哈尔滨工业大学研发了一种基于固定平台的手术系统，东南大学开发了下肢骨骼手术固定系统，北京航天航空大学主导开发的天玑骨科手术机器人^[9]由北京天智航医疗科技有限公司生产，是国内首个获得医疗器械注册证的手术机器人产品。它被用来帮助医生精确定位植入物或手术器械的应用范围从脊柱外科到创伤骨科。2019 年北京积水潭医院完善了世界上首个基于术中实时三维图像的胸腰椎骨折微创内固定，世界上首个术中实时微创内固定。基于 3D 图像的机器人辅助寰枢椎经关节螺钉内固定及世界上首个基于术中实时 3D 图像的机器人辅助齿状突骨折内固定。

2 机器人系统

骨折复位手术是涉及骨科治疗所需全部操作的手术，即骨折节段的重新定位和复位后的固定。相应地，目前正

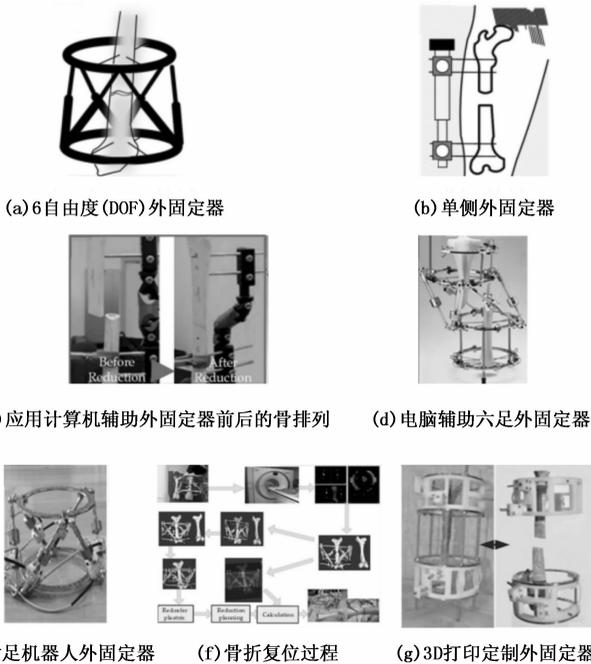


图 1 外固定器和基于外固定器的骨折复位机器人

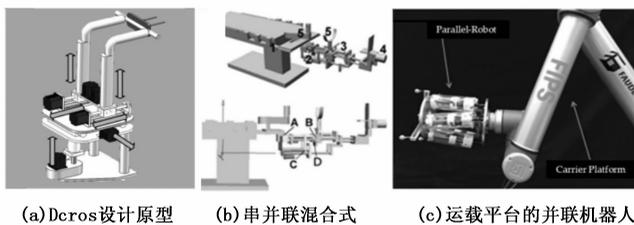


图 2 串并联混合式骨折复位机器人

在研究的机器人可分为重新定位机器人 (复位机器人) 和固定机器人。固定机器人主要起到术中定位功能，如髓内钉固定远端锁定定位等，类似于关节置换和脊柱椎弓根螺钉植入的机器人。然而，骨折的重新定位是骨折手术固定前的主要程序。有学者指出，准确的解剖复位是骨折手术治疗的关键步骤。未能重新调整骨折部位将充分导致延迟愈合、畸形愈合或不愈合。因此，复位机器人的研究是骨折复位手术机器人系统的关键技术。目前，重定位机器人的结构主要有 4 种：1) 基于外固定框架结构；2) 基于工业机器人的串行结构；3) 平行结构；4) 串并联混合结构。除了以上 4 种类型之外，还有一些其他类型的复位机器人。例如，基于牵引床的变换，基于软气囊的套筒式骨折节段复位器。

2.1 人机协同系统

骨折复位人机协同系统设计是保障病人安全和提高手术质量的一个复杂而关键的过程。临床实践表明，设计不当的设备会导致错误和相关事故。为此安全性设计是首要的，文献 [10] 指出骨碎片之间的安全距离：过度的牵引可能会损伤坐骨神经。虽然需要四肢的牵引运动，但必须

在安全范围内。骨科医生推荐的牵引距离安全范围在近端和远端骨碎片之间为 25~30 mm。文献 [11] 讨论了过度复位力可能会对四肢的软组织造成伤害。因此, 设计了用于控制断裂复位力的力限制器, 从而可以调节力极限, 如图 3 所示。除此之外, 骨折复位人机协同系统成功设计的另一个关键要素是在开发过程中尽早整合主要和次要利益相关者的观点。文献 [12] 提出为了提高骨科医疗设备的采用率, 开发人员必须对将使用该设备的临床医生、患者和护理人员有一个清晰和透彻的了解。文献 [13-16] 指出开发人员必须进行早期用户研究, 以了解和指定使用环境以及用户和组织要求。尽管一些医疗设备制造商已经在其产品中纳入了人的因素原则, 但在这种参与的实际性方面仍然缺乏相应的工作。

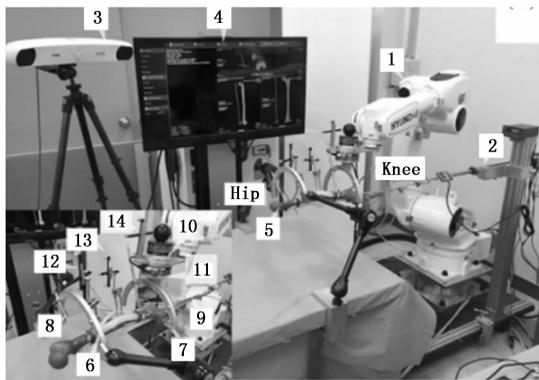


图 3 手扶式人机协同骨科机器人系统

2.2 骨科生物力学机制与模型仿真研究现状

生物力学机制与模型研究用于骨科训练和手术预演, 指导骨科手术机器人的控制策略和设计参数要求。有两种生物力学建模方法: 质量弹簧法(如图 4 所示)和有限元法。质量弹簧模型^[17]包括一组由弹簧连接的节点, 每个节点都有点质量, 使用有限数量的节点来实现实时性能, 但通常不够稳定。由于软组织的真实弹性行为是非线性的, 有限元方法能产生更准确的结果^[18]。有限元法擅长生物力学分析, 已被证明是研究人体内部信息的一种很有前景的工具。目前已经有很多成功的研究工作, 如利用有限元法研究腰椎、足部、手臂等的生物力学特性, 但将研究重点放在腿部, 尤其指导骨折复位的骨科手术方面, 很少有实际的模型^[19-20]。文献 [21] 提出了一种组织双力学模型, 但只使用特定对象的 CT 图像数据创建一个下肢有限元模型, 缺少骨折复位装置的模型, 不具有统计测试能力。

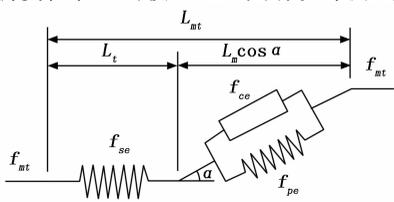


图 4 骨骼生物力学模型

2.3 机器人控制与交互技术

骨折复位手术机器人的主要优点是通过遥控和自动控制有效地减少了辐射。不同控制技术的对比表还没有临床数据, 无法给出准确的数据范围。但是, 可以根据控制方法本身的原理推断出彼此之间的性能差异。

1994 年, M. Bouazza 首次使用机器人在外科医生的遥控下执行骨折手术中的定位和钻孔操作^[22]。遥操作主要包括基于操纵杆和基于主结构的控制方法。基于操纵杆的控制是一种二维控制方法, 它只能在图像平面内移动对象。R. Westphal 等人^[23]首先利用操纵杆实现骨折骨的平移和旋转运动。基于操纵杆的远程操作的最大好处是成本低、学习曲线短, 而缺点是缺乏触觉反馈^[24]。除此之外, C. Li 等人^[25]提出了一种触觉反馈结构, 与基于操纵杆的控制相比, 该结构具有更直接的主从对应关系, 可以简化运动计算。自动控制是基于远端骨折节段状态之间的相对转换。其复位效果取决于术前计划、复位算法和机器人本身的精度^[26-28]。文献 [29] 对股骨骨折复位的几种算法进行了比较和总结, 表明自动控制比遥控更为精确。考虑到一些复杂的骨折, 自动控制方便、准确, 可实现精细运动。然而, 自动控制在很大程度上依赖于详细的术前计划, 对意外的术中情况没有很好的反应。为了使外科医生更容易控制机器人, 许多学者也研究了人机交互。大多数人机交互是在导航和路径规划过程中使用计算机接口直接输出图像, 从而使外科医生能够调整或重新规划手术路径。Y. Su 等^[30]将体感交互作用引入骨折复位机器人中, 使操作者在骨折复位手术实验中能够利用手势来控制机器人。

2.4 “骨-机器人”连接技术

由于机器人骨折复位手术是一种微创手术, 骨-机器人连接不能由大型接触工具(如大型咬骨钳)完成。然而, 放弃大面积的接触可能会降低连接的强度, 即如何完全夹紧骨头来完成复位仍然是一个难题^[31]。常用的骨-机器人连接方法有: 1) 外固定销或螺钉连接(如图 5 所示); 2) 通过脚靴的连接。

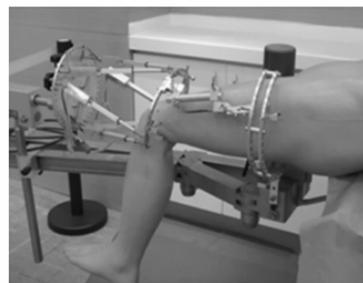


图 5 骨机连接机构

文献[32-33]中使用的单侧外固定器方法是通过单个皮质外固定钉连接的。用外固定钉将文献 [34] 中的圆形外固定方法改为不完全圆形结构。6-PTRT 机器人^[35]通过贯穿脚踝的针头与患者相连。G. Thomas 等人^[36]用螺栓穿过骨髓, 结合一个 Schanz 螺钉将机器人连接到骨折段的远

端,从而形成更坚固的结构。C. Li 等人^[37]将骨针固定在环上,环固定在与机器人相连的底盘上。韦伯一斯皮克申等人^[38]使用传统的外固定器、复位板和三点装置测试了 3 种不同的机器人-骨连接方法。Giulio 等人^[39]提出了一种创新的关节骨折夹持装置,使用定制的骨科连接骨,有一个微创的一个切口和一个骨孔。在通过脚靴的连接方面^[40-41],通过软组织实现连接,可以有效减少伤口。然而这种连接是“软连接”,无法实现骨机器人的实体关节,很难精确地进行力和力矩传导。

3 导航系统

手术导航是一种经过计算机图像处理的可视化系统,可提供有关手术器械和植入物及其对目标器官的方向的重要临床信息。此类系统通常利用 3D 位置传感器进行空间定向。这些传感器能够跟踪目标器官、手术工具和植入物。任何导航系统的关键步骤是提供位置信息并结合有关手术工具的信息的手术计划。在临床实践中,骨科手术导航方法主要有:CT 导航^[42-43]、二维/三维透视导航^[44-45]、超声导航^[46]、电磁导航^[47-48]、无图像导航^[49-51]等。CT 导航:可获得骨组织的高精度断层数据。通过图像处理技术,可以重建骨折部位,并用可视化图像进行显示。然而,CT 扫描是一个相对高剂量的过程。透视导航:采用 C-arm、G-arm 或 O-arm 进行图像采集,具有较高的实时性。与二维透视相比,三维透视导航可以在手术过程中提供更精确的术前规划和三维可视化^[52],在手术中得到了广泛的应用。但由于体积效应的影响,得到的三维图像效果不如 CT。超声导航(基于超声成像):是一种新兴技术,其最大的优点是无创性。但是,它可能会受到不同因素的干扰,如超声波速度、距离、组织变形等。电磁导航:与光学跟踪相比,除了具有非侵入性外,最大的优点是不受视野遮挡的限制。但是,它会受到周围电磁场和金属医疗设备的影响。无图像导航(光学跟踪):指通过光电跟踪系统确定不同的解剖结构和参考标记,建立手术物体的虚拟表示,复位精度能达到 1 毫米以内。为了实现精确复位,还需要进行图像配准,目前的配准策略主要有两种:一种是基于解剖统计的配准策略;另一种是基于对侧骨图像的配准策略^[53-54]。在这两种方法中,以统计数据库中的骨模型数据或对侧重建模型数据的镜像图像作为复位准则,利用 CT 扫描得到的骨折近端和远端图像求解复位变换矩阵。

3.1 基于 3D 图像的导航

基于 3D 图像的导航通常使用体积图像,如图 6 所示。临床数据通常由 CT、MRI 和超声图像提供。比较单个图像模式的好处,CT 是最常用的,因为它提供了许多优点。首先,CT 成像允许在骨骼和周围软组织之间具有高对比度、长扫描范围和短扫描时间的高分辨率图像^[55-56]。由于骨骼以相当大的对比度显示,因此很容易执行骨骼的有效分割。该分割过程生成骨骼模型,其中其他结构被抑制。此外,通过使用高速 CT 扫描仪,可以避免 3D 骨骼模型的运动伪

影。这种类型的导航系统成功地用于脊柱椎弓根螺钉插入、腕关节置换术 (THA)、骨盆截骨术^[56-57]。

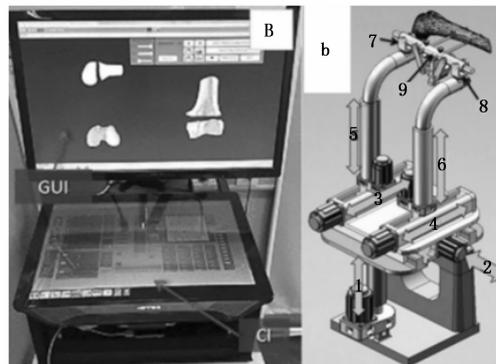


图 6 骨科手术导航系统

3.2 基于透视的光学导航

主要优点是与体积导航相比成本更低。基于透视图像,可以创建在手术期间使用的引导图。通过将动态参考坐标系连接到 C 臂和目标骨骼来生成透视图像。此过程确定图像相对于患者的位置。它使用 CAD 文件,其中包含植入物和带有动态参考坐标系的手术工具,这些文件叠加在图像上,无需配准程序^[58-59]。这种系统的一个显著好处是不需要配准;由于重复使用前几张图像来指导手术过程,因此减少了计算时间并降低了辐射剂量。该系统通常用于骨折复位和固定。在脊柱和骨盆的情况下,使用来自多个 C 臂图像的基于透视 3D 图像的导航^[60]。但是,将 3D 的 C 臂图像与 CT 图像进行比较,在质量上存在很大差异;CT 图像质量更高。为了防止图像失真,使用了同时成像的校准标记。

3.3 无图像导航

这种导航的特点是它不需要术前和术后图像来规划和指导手术^[61]。代替这些程序,关节动力学信息和骨骼形态信息用于规划和设计引导图。关于其在骨科中的应用,这种系统最初是为 TKA 和 THA 应用开发的^[62-63]。动态参考坐标系固定在骨盆、股骨和胫骨上,以找到股骨和胫骨机械轴的位置和坐标。在随后的步骤中,计算臀部、膝盖和脚踝的中心。该计算是针对每个关节被动运动期间动态参考坐标系相对运动的中心进行的。这种导航的一个显著好处是它不需要图像配准。股骨旋转对齐是通过参考上髌线、后髌线或沟线来调整的,这些线是通过触摸标志物来确定的^[64]。参考胫骨后线或胫骨结节调整胫骨旋转对齐。该方法基于图像变形,提高了膝盖区域图像的准确性和视觉信息。考虑到韧带平衡和轴向对齐,这提供了最佳折衷方案。关于 THA 的术前成像和计划,与 CT 导航相比,无图像导航是一种成本更低、时间要求更低的方法。

3.4 图像配准

配准基于图像,是计算机辅助系统中的关键步骤之一。通常用于对齐术前和术后图像,或对齐治疗对象和虚

拟对象。在此过程中,将两个或多个单独的图像进行匹配并对齐为一个输出图像,从而提供更多有价值的信息^[65-66]。通常,在医学图像配准中,通过使用几何变换(例如相对于固定图像(目标图像)的平移,旋转,缩放或变形)来修改和调整源图像。由于对象的移动(由患者的移动或患者位置的变化引起),图像配准是处理来自同一成像系统的图像的不同时间依赖帧的重要过程。从不同图像源获取的图像配准非常重要,因为它在不同图像中提供了相同结构的不同表示^[67]。当前,医学图像配准系统面临的挑战是精确,计算效率高以及临床上可接受的配准技术的问题。医学图像配准能够从不同的临床图像中提供有用的临床信息,在准确性和效率之间取得平衡。除了的这些问题外,还应考虑其他挑战包括自动图像配准的可能性,骨骼标志的检测,多峰图像的配准和以及对临床图像中异常值的鲁棒性。

配准基于从源图像(运动图像)计算出的参考点的变换。这些点通过使用各种变换方法(包括刚性和非刚性变换)进行映射并与目标图像匹配。刚性变换基于运动对象(源图像)相对于目标图像坐标的平移和旋转。刚性变换的一个特定特征是它保留了相同的几何特征,即各个点之间的角度和距离相同。仿射变换执行缩放,剪切和旋转。该方法对异常值和图像伪影具有精确性和鲁棒性。此方法的另一个好处是,它可以轻松对齐从多个来源获得的临床图像^[68]。域转换通过图像域中的转换执行配准过程。域转换的好处是它既可以应用于整个图像区域,也可以应用于图像的子部分。在这种类型的配准中,以获取更准确的信息为目标,将像素信息转换到另一个域中。配准域通常分为全局配准和本地配准。局部变换涉及源图像和目标图像的局部几何特征。全局变换涉及整个图像区域中的所有图像参数。此类配准受参数的任何修改影响。全局变换可以通过使用受图像噪声和伪影影响的局部参数来有效地进行,因为它可以抑制信号的这些部分,作为配准变换领域中使用的图像预处理方法的一部分^[69]。

图像配准中非常重要的因素是图像尺寸,因为可以通过使用图像坐标系或图像和物理相位进行转换。基于维度,图像配准可以是空间的,也可以配准时间序列。根据几何尺寸的数量,区分2D与2D,2D与3D和3D与3D配准。基于时间序列配准的临床图像动态序列分析可以随时间跟踪骨骼特征。一种流行的转换类型是基于优化过程的配准。在此方法中,重复执行配准过程以优化转换参数。在此,配准通常基于最大化分析图像之间的相似性。优化过程迭代地重新计算并调整源图像和目标图像之间的配准参数差异。配准性能取决于优化过程的准确性。优化过程的关键任务是选择具有高度相似性的适当参数。最后,根据相似性指标,将获得的参数用于获得最佳匹配的图像^[70]。

通常,可以以三种方式执行图像配准:半自动技术,全自动技术和交互式配准。当术前图像空间需要与实时物理空间相关时,交互式分割用于临床应用^[71]。交互式配准

涉及以下过程。第一步,通过扫描仪(MRI或CT)获取临床图像;因此,根据专家的经验以交互方式选择了感兴趣的区域(ROI)。在下一步中,将可互操作的图像与术前图像进行匹配并对齐。这种配准的主要好处是ROI的动态匹配和跟踪。通过自动和半自动选择ROI来自动配准多峰和结构图仍然是一个充满挑战的研究问题。这些程序非常重要,因为它们可以从术前和术中图像中检测出相似区域(无需用户交互)^[72]。

4 结束语

计算机辅助骨科机器人系统的主要好处是通过提高手术程序的精确性,从放射图像中消除异常值,如微创手术,并可以利用计算机辅助骨科机器人系统对新医生进行教育和培训。术前计划可以进行手术模拟,从而优化手术计划。通过使用基于体积的导航可以减少术中辐射暴露,并且通过使用机器人铣削可以显着减少术中肺栓塞的体积。手术需要额外的操作来放置和植入标记,这会导致手术时间的延长,同时也会增加失血量。在这种情况下,由于减少了辐射剂量和手术时间,透视导航是合适的。通过整合新的方法、仪器、图像混合和可视化可能性,计算机辅助骨科机器人技术在减少侵入性方面具有强大的未来潜力。

另一个重大突破是计算机辅助骨科机器人系统可以由基于增强现实的技术的集成,包括覆盖显示器和双筒望远镜以及用于光束引导的系统。计算机辅助骨科机器人系统的重要作用是在新的髋关节和膝关节植入物中,与常规植入物相比,它们的尺寸更小,即只需一个小切口即可在一次手术中进行软骨置换和同时进行韧带重建。

通过对近十年来骨科手术机器人的发展进行了回顾。骨科手术机器人作为医疗与工程相结合的产物,近几年来取得了长足的进步。目前,临床上还没有真正的骨折复位机器人。由于模型骨骼、动物骨骼或尸体实验与实际临床案例有很大不同,因此很多机器人无法完美满足临床要求。主要有两个方面的难点:1)缺乏对现实生物力学特性的考虑。人体生物力学模型非常复杂。虽然有学者通过几何和动力学分析建立了机器人模型,如提出了一种组织双力学模型,但此类研究仅在极少数情况下受到限制。目前对现实生物力学特性的研究无法为骨折复位手术机器人提供足够的支持来进行更好的路径规划和其他操作;2)不具有成本效益。目前研究的骨科手术机器人大多只能进行一些简单的辅助性操作(有些甚至需要牵引设备的帮助),而且成本相当高。

未来,骨科手术机器人将朝着低辐射、微创、操作简单、适应性强的方向发展。为保证手术的准确性,目前计算机辅助骨科机器人系统中的大部分成像和导航系统都是基于术前或术中CT数据和人工影像分割重建。医务人员和患者的累积辐射剂量仍然是一个大问题。随着人工智能的快速发展以及基于大数据的机器学习和深度学习对医学图像的自动处理,预计将实现计算机辅助骨科机器人系统的

自动术前规划、导航和执行, 计算机辅助骨科机器人系统中的辐射剂量可以显著降低, 而无需牺牲准确性。计算机辅助骨科机器人系统的机制和流动路径可以在人工智能驱动的机器人中进行优化。

参考文献:

- [1] YE R, CHEN Y. Development of a six degree of freedom (DOF) hybrid robot for femur shaft fracture reduction [C] // Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009; 306-311.
- [2] WANG S, CHEN Y, PING Z. Control simulation of a six DOF parallel-serial robot for femur fracture reduction [C] // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, 2009; 330-335.
- [3] YE R, CHEN Y. Path planning for robot assisted femur shaft fracture reduction; a preliminary investigation [C] // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, 2009; 113-117.
- [4] YE R, CHEN Y. A simple and novel hybrid robotic system for robot-assisted femur fracture reduction [J]. *Adv. Robot.*, 2012, 26; 83-104.
- [5] HUNG S, LEE M. Functional assessment of a surgical robot for reduction of lower limb fractures [J]. *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, 2010, 6: 413-421.
- [6] DAGNINO G, GEORGILAS I, TARASSOLI P, et al. Vision-based real-time position control of a semi-automated system for robot-assisted joint fracture surgery [J]. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, 2016, 11: 437-455.
- [7] ABEDINNASAB M, FARAHMAND F, GALLARDO J. The wide-open three-legged parallel robot for long-bone fracture reduction [J]. *J. Mech. Robot.*, 2017; 9-17.
- [8] WANG L, WANG T, TANG P, et al. A new hand-eye calibration approach for fracture reduction robot [J]. *Comput. Assist. Surg.*, 2017, 22; 113-119.
- [9] 王 昆, 王晓峰, 郝 潇. 基于 STFT 的微创手术机器人运动控制系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (5): 45-48, 78.
- [10] JOUNG S, PARK I. Medical robotics for musculoskeletal surgery [J]. *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics*, 2016; 299-332.
- [11] JACKSON A, HOLT R, CULMER, et al. Dual robot system for upper limb rehabilitation after stroke: the design process [J]. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 2007; 845-857.
- [12] MARTIN J, CLARK D, MORGAN S. A user-centred approach to requirements elicitation in medical device development: a case study from an industry perspective [J]. *Appl. Ergon.*, 2012, 43: 184-190.
- [13] MARTIN J, BARNETT J. Integrating the results of user research into medical device development: insights from a case study [J]. *BMC Med. Inf. Decis. Mak.*, 2012; 12-74.
- [14] MARTIN J, NORRIS B, MURPHY E. Medical device development: the challenge for ergonomics [J]. *Appl. Ergon.*, 2008, 39; 271-283.
- [15] KOROTCHENKO A, MIHAILIDIS P. Power mobility with collision avoidance for older adults: user, caregiver, and prescriber perspectives [J]. *J. Rehabil. Res. Dev.*, 2013; 1250-1287.
- [16] LOCKTON D, HARRISON D, STANTON N. The design with intent method: a design tool for influencing user behaviour [J]. *Appl. Ergon.*, 2010, 41; 382-392.
- [17] MINXIU K, ZHI D, LINING S, et al. A robot-assisted orthopedic telesurgery system [C] // IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference Proceedings, 2005; 1661-1667.
- [18] MORTEN B, TAUKO L. Finite element modeling in surgery simulation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998; 3-17.
- [19] NABHANI M, UILA T. Computer modeling and stress analysis of the lumbar spine [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002; 40-47.
- [20] JASON T, MING Z, AARON K, et al. Three-dimensional finite element analysis of the foot during standing a material sensitivity study [J]. *Journal of Biomechanics*, 2005; 1045-1054.
- [21] WANG M, SAN L. Development and validity of tissue biomechanics modeling for virtual robot assisted orthopedic surgery system [C] // 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE), 2009; 89-98.
- [22] MAROUF B, BROWBANK K, HEWIT I. Robotic-assisted internal fixation of femoral fractures [J]. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, 1995, 20; 51-58.
- [23] WESTPHAL R, WINKELBACH S, WAHL F, et al. Robot-assisted long bone fracture reduction [J]. *Int. J. Robot. Res.*, 2009, 28; 1259-1278.
- [24] SUERO E, HARTUNG M, WESTPHAL T, et al. Improving the human-robot interface for telemanipulated robotic long bone fracture reduction: Joystick device vs. haptic manipulator [J]. *Int. J. Med Robot. Comput. Assist. Surg.*, 2018; 1851-1863.
- [25] LI C, WANG T, HU L, TANG P, et al. A novel master-slave teleoperation robot system for diaphyseal fracture reduction: A preliminary study [J]. *Comput. Assist. Surg.*, 2016; 162-167.
- [26] BUTLER K, LUTZ O, ANGELINI M, et al. Computer navigation in the reduction and fixation of femoral shaft fractures: A randomized control study [J]. *Injury*, 2012, 43; 749-756.
- [27] WINKELBACH S, MOLKENSTRUCK S, WAHL F. Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach [J]. *Pattern Recognition Proceedings*, 2006; 718-728.
- [28] WESTPHAL R, WINKELBACH S, GOSLING T, et al. Automated robot assisted fracture reduction [D]. Springer

Verlag, 2009; 251 - 259.

- [29] SUERO E M, WESTPHAL R, CITAK M, et al. Comparison of algorithms for automated femur fracture reduction [J]. *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, 2018, 14 (1): 6 - 14.
- [30] SU Y, SUN Z, ZHU G, et al. Experiments research of somatosensory interaction based control method for fracture reduction robot [J]. *Chin. J. Biomed. Eng.*, 2016, 35: 380 - 384.
- [31] ZHAO Y. Development of a surgical robot system for long bone fractures [D]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Medical College, 2016; 52 - 56.
- [32] FUCHTMEIER B, EGERSDOERFER S, MAI R, et al M. Reduction of femoral shaft fractures in vitro by a new developed reduction robot system RepoRobo [J]. *Injury*, 2004, 21: 113 - 119.
- [33] YE R, CHEN Y. Development of a six degree of freedom (DOF) hybrid robot for femur shaft fracture reduction [C] // *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2009; 306 - 311.
- [34] WANG J. Q, HAN W, LIN H. Femoral fracture reduction with a parallel manipulator robot on a traction table [J]. *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, 2013, 9: 464 - 471.
- [35] YU L. Key techniques of 6-parallel robot and their application in orthopaedic surgery [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007; 34 - 39.
- [36] WESTPHAL R, WINKELBACH S, WAHL F, et al. Robot-assisted long bone fracture reduction [J]. *Int. J. Robot. Res.*, 2009, 28: 1259 - 1278.
- [37] LI C, WANG T, HU L, et al. Accuracy analysis of a robot system for closed diaphyseal fracture reduction [J]. *Int. J. Adv. Robot. Sys.*, 2014; 161 - 169.
- [38] JIA Z, DU Z, MONAN W. A novel finite element method based biomechanical model for HIT-robot assisted orthopedic surgery system [C] // *Proceedings of the 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2006; 1735 - 1738.
- [39] DAGNINO G, GEORGILAS I, TARASSOLI P, et al. Design and real-time control of a robotic system for fracture manipulation [C] // *Proceedings of the 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2015; 4865 - 4868.
- [40] WARISAWA S, ISHIZUKA T, MITSUISHI M, et al. Development of a femur fracture reduction robot [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004; 3999 - 4004.
- [41] MAEDA Y, SUGAN N, SAITO M, et al. Robot-assisted femoral fracture reduction: preliminary study in patients and healthy volunteers [J]. *Comput. Aided Surg.*, 2008, 13: 148 - 156.
- [42] METTLER F, WIEST P, LOCKEN J, et al. CT scanning: patterns of use and dose [J]. *J. Radiol. Prot.*, 2000, 20: 353 - 364.
- [43] KOVANDA T, ANSARI S, QAISER R, et al. Feasibility of CT-based intraoperative 3D stereotactic image-guided navigation in the upper cervical spine of children 10 years of age or younger: initial experience [J]. *J. Neurosurg. Pediatr.*, 2015, 16: 590 - 598.
- [44] MITSCHKE M, NAVAB N. Recovering the X-ray projection geometry for three-dimensional tomographic reconstruction with additional sensors: attached camera versus external navigation system [J]. *Med. Image Anal.*, 2003, 7: 65 - 78.
- [45] WENDL K, WENTZENSEN A, GRÜTZNER P. Iso-C (3D0-assisted) navigated implantation of pedicle screws in thoracic lumbar vertebrae [J]. *Der Unf.*, 2003, 106: 907 - 913.
- [46] AMIN D, KANADE T, DIGIOIA A, et al. Ultrasound registration of the bone surface for surgical navigation [J]. *Comput. Aided Surg.*, 2003, 8: 1 - 16.
- [47] JAKO V, CARRINO R, YONEMURA J, et al. Electromagnetic navigation for percutaneous guide-wire insertion: Accuracy and efficiency compared to conventional fluoroscopic guidance [J]. *Neuroimage*, 2009, 47: 127 - 132.
- [48] LIONBERGER D, WEISE J, HO D, et al. How does electromagnetic navigation stack up against infrared navigation in minimally invasive total knee arthroplasties [J]. *J. Arthroplast.*, 2008, 23: 573 - 580.
- [49] SPARMANN M, WOLKE B, CZUPALLA H, et al. Positioning of total knee arthroplasty with and without navigation support—a prospective, randomised study [J]. *J. Bone Jt. Surg. Br.*, 2003, 85: 830 - 835.
- [50] MUTHU G, ENDITTOLI V, LAVIGNE P, et al. Femoral component positioning in hip resurfacing with and without navigation [J]. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 2009, 467: 1341 - 1347.
- [51] LELOUP T, KAZZI W, SCHUIND F, et al. Conception of a navigation system controlling diaphyseal fracture reduction treated with external fixation [J]. *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, 2009, 5: 99 - 109.
- [52] WANG M, SONG Z. Optimal number and distribution of points selected on the vertebra for surface matching in CT-based spinal navigation [J]. *Comput. Aided Surg.*, 2013, 18: 93 - 100.
- [53] KEAST B, LUTZ O, ANGELINI M, et al. Computer navigation in the reduction and fixation of femoral shaft fractures: A randomized control study [J]. *Injury*, 2012, 43: 749 - 756.
- [54] HU L, ZHANG J, LI C, et al. A femur fracture reduction method based on anatomy of the contralateral side [J]. *Comput. Biol. Med.*, 2013, 43: 840 - 846.
- [55] OTA D, ISHII M, HAGER G. Vision-based navigation in image guided interventions [J]. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 2011, 13: 297 - 319.
- [56] EGGERS G, MÜHLING J, MARMULLA R. Image-to-patient registration techniques in head surgery [J]. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, 2006, 35: 1081 - 1095.

(下转第 13 页)