

基于主动光源阵列的骨科机器人末端示踪装置

冯逾鹏^{1,2}, 张杰², 杨兴海^{1,2}

1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 海军军医大学长征医院骨肿瘤科, 上海 200003

【摘要】为减少机械臂导航过程中示踪装置视线遮挡问题对手术的影响,研究一种多角度主动光源阵列的末端示踪装置,采用非支架式的机械结构,配合双目相机,实现对手术机械臂位置的感知。通过大小两个棱柱相互配合,组成多角度的光源阵列,实现对机械臂工具中心点的计算。通过COMSOL软件搭建简易模型,验证示踪装置信号使用范围;通过覆盖范围实验和静态定位实验证明装置的有效性和稳定性,可以满足手术机器人的任务要求。

【关键词】主动光源;手术机器人;导航定位;示踪装置

【中图分类号】R318;R197.39

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)02-0220-07

Terminal tracer equipment based on active light source array for surgical robot

FENG Yupeng^{1,2}, ZHANG Jie², YANG Xinghai^{1,2}

1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Bone Oncology, Shanghai Changzheng Hospital, Naval Medical University, Shanghai 200003, China

Abstract: A non-bracket terminal tracer equipment with multi-angle active light source array is developed to reduce the effects of view obstruction on robot navigation. The multiple-angle light source array is established using a large prism and a small prism, and then the positions of the mechanical arm and the tool center point are calculated via the cooperation of binocular cameras. A simple model built with COMSOL software is used to verify the signal coverage of the tracer equipment. The experiments conducted for signal coverage and static positioning demonstrate its effectiveness and stability, suggesting that the tracer equipment can meet the task requirements of the surgical robot.

Keywords: active light source; surgical robot; navigation and positioning; tracer equipment

前言

传统的开放式手术和机械人工操作手段需要大范围暴露患者的组织关节,并通过术中影像来实现手术定位,会对医患双方的身心带来一定的挑战^[1]。随着手术机器人系统的不断发展,工程技术和临床医学进行深度融合,提高复杂手术过程中精度控制的能力^[2-3],实现对病灶的准确定位^[4-6],并辅助医生完成很多高难度的手术,减少辐射暴露^[7-9],以及术后并发症和不良事件发生的概率^[10-11],展现出巨大的应用价值和潜力^[12]。术中导航是手术机器人系统的

关键技术,其目标是为了获得机械臂到病灶位置的刚性变换关系,配准精度和效率在很大程度上决定了导航系统的优劣和手术的成败^[13]。现有手术机器人系统大多采用光学定位作为其位姿反馈与目标检测的重要手段。由于系统对视线的要求,在手术导航过程中,必须保证相机和装置间没有遮挡^[14],但通过临床应用中的实际反馈,医护人员的站位、机械臂运动以及示踪球间的相互干涉,都有可能造成双目视觉丢失目标,造成导航的失败^[15]。

目前,多数研究者主要面向视觉导航和图像处理方面进行改进,使用深度学习和神经网络等前沿算法,仅有少数科研单位对光学定位装置进行研究^[16-18]。其中,陈泉林等^[19]将装有红外LED的定位器与牙科手机连接,在手术过程中,通过手机上的定位板来确定器械与患者之间的相对位置,从而达到辅助定位和手术引导的目的。但装置的示踪板体积过大,不利于手术的精确操作。Zhou等^[20]提出一种基于立体视觉的低成本光学跟踪系统,使用红外

【收稿日期】2023-06-19

【基金项目】上海申康医院发展中心新兴前沿技术联合攻关项目 (SHDC12020101);上海市浦江人才计划(2020PJD062)

【作者简介】冯逾鹏,硕士,研究方向:生物医学工程, E-mail: 1640470350@qq.com

【通信作者】杨兴海,副教授,副主任医师,研究方向:外科学、肿瘤学、生物医学工程, E-mail: cnspineyang@163.com

LED作为标记,该系统具有较高的精度和稳定性,可以满足手术导航的要求。但并未脱离支架式的结构,依旧会出现标志点互相干涉的问题,无法更好地满足临床需求。

为了实现机器人辅助手术,提高定位的精确度、可靠性和安全性。针对手术机器人机械臂的结构特点,在双目视觉相机的基础上,提出一种非支架式多角度主动光源阵列的手术机器人末端示踪装置,选用近红外辐射发光二极管(Near-Infrared Emitting Diode, NIR-ED)作为光源,将多个NIR-ED组成光源阵列,并集成到手术机器人的末端执行器上,从而提高红外信号的覆盖范围和双目相机识别的精确性,对提升手术机器人的精准性和安全性具有重要意义。

1 末端示踪装置的设计

1.1 设计需求

由于光学定位系统对视线有较高的要求,必须始终保持双目相机和示踪装置间没有遮挡^[21]。传统手术导航使用的成熟商用方案是采用被动式无源标记球,标记球上有特殊涂层,通过反射红外光后实现定位^[22]。但根据临床医生对手术机器人的使用反馈,在实际手术过程中,机械臂执行导航动作到达特殊角度时,常常会超出无源标志球的工作范围,失去对机械臂的跟踪,导致手术导航失败。这种支架式的被动示踪球还会存在目标遮挡和相互干涉的问题^[23]。图1a是在正常情况下,红外相机正确识别到两个标志点;但在实际应用中,标志点必须不少于3个,图1b表示3个示踪球到达一定位置,产生互相干涉,在相机中的成像重叠,此情况可通过算法改善;图1c表示小球成像被完全遮挡,该情况计算机无法正常识别。

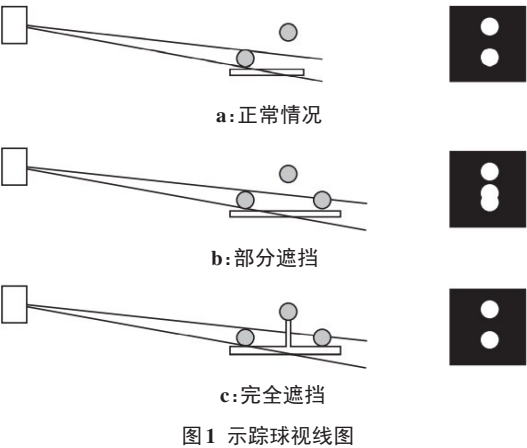


Figure 1 Tracer ball vision diagrams

本文尝试设计一种非支架式的示踪装置以避免这些问题,采用基于主动近红外光源阵列的标志点来最大程度减小遮挡和干涉对于跟踪识别的影响,且由于红外目标特征明显易于识别,在实时视觉跟踪上具有研究价值^[24]。综合以上分析,手术机器人定位系统的应用主要存在如下挑战:(1)现有光学手术定位系统存在红外信号范围不足、视线易被遮挡和标志点干涉造成目标丢失的问题;(2)安装在机械臂上的示踪球位置结构突出,干扰手术操作,并有零件掉落风险和消毒方面的问题^[25];(3)反射红外光形式的手术定位系统易受外部环境的影响,且精度偏低。为了减小现有技术存在的局限性,本研究致力于搭建一套性能稳定、精度较高且具备一定防遮挡能力的光学手术定位装置,以满足临床应用。

1.2 机械结构的设计

理想的示踪装置应避免占用过多手术空间,并且减少示踪球之间的互相干涉。目前主流的示踪装置是将反光球固定在平面支架上,该结构突出于机械臂,手术前需进行灭菌处理和较多的准备步骤^[26]。因此,可将示踪装置集成于机械臂,从而简化手术操作、缩短术前准备时间、提高手术效率。

多角度示踪装置包括示踪装置、绝缘法兰和导向装置,抛弃了平面支架式机构,将示踪部件直接与机械臂连接。其主体由一大一小两个棱柱组合而成,在每个棱柱面上安装一个NIR-ED光源,进而形成多个朝向不同的光源阵列。在导航过程中,双目相机能够识别和跟踪不同角度下的装置,无需术者进行其他移动,减小了术中调整双目相机产生失误的几率。示踪装置尾部与绝缘法兰配合后集成在机械臂上,定位销头部做成尖端来戳破包裹机械臂的无菌套,前端可以安装导向装置,用来定位病灶和固定手术器械,其布局如图2所示。

1.3 多角度光源阵列的设计

示踪面的可视区域由红外发射器的发射角度决定的。双目相机接收到红外发射器的信号,导航系统识别该示踪面后,通过矩阵变换算法确定装置所在位置。超出双目相机的可视范围或者装置的发射范围,系统都无法识别示踪平面。为了增大示踪器反射红外线的范围,将NIR-ED光源分别设置在两个棱柱的棱面上,每3个光源可形成1个示踪面,从而形成不同的阵列。如图3所示,当红外发射器发射出红外信号,导航相机捕捉到点a、点b、点c时,系统根据排布形状确定此时对应平面为示踪面1,并根据该示踪面与机械臂之间的位置关系进行计算,通过矩阵变换可以得知装置的工具中心点,进而控制机械臂的空间运动。

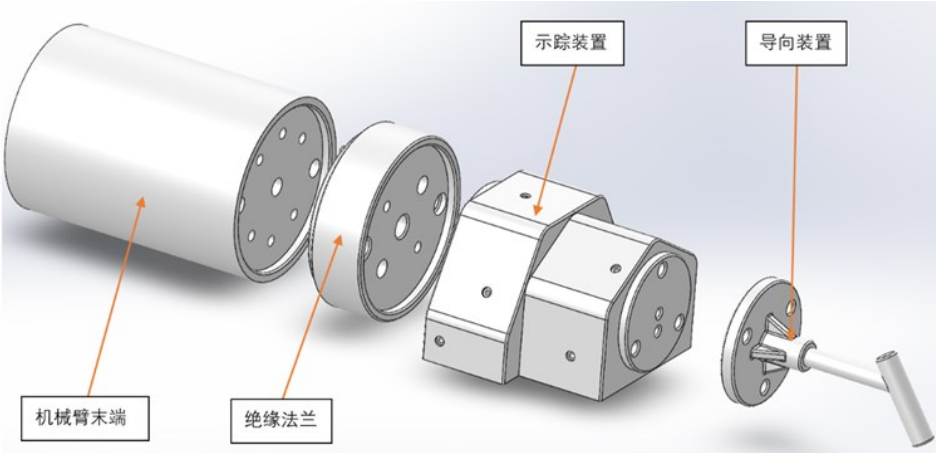


图2 机械结构爆炸视图
Figure 2 Exploded view of mechanical structure

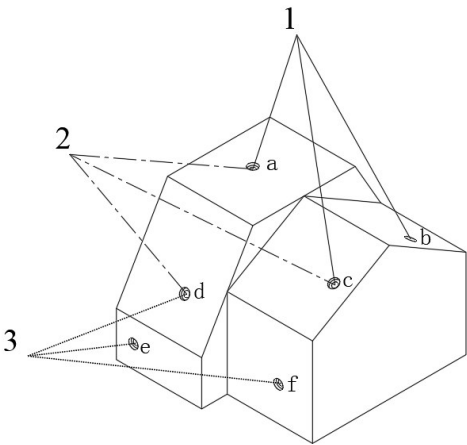


图3 光源三维分布
Figure 3 Three-dimensional light source distribution

设计有源的示踪装置时也应考虑其算法方面的独特几何约束。如图4所示,3个NIR-ED构成的光源阵列必须要保证形成示踪面的三角形唯一,该三角形通过旋转、翻转和平移操作后,不与其他示踪三角形重合,以此可以确定与之相对应的特定示踪面。在实际设计的过程中,并未将所有邻近的3个光源都编成一组阵列,其原因是过于密集的阵列有几率会让双目相机识别到同一装置的多个示踪面,从而影响对示踪装置工具中心点的计算,也会减慢软件和算法的速度。

1.4 电路设计

示踪装置电路有4个主要部分:电源系统、近红外接收器、系统微控制器和NIR-ED标志阵列,如图5所示。手术机器人导航启动时,视觉装置会发出短脉冲红外光。通常情况下,手术无影灯的工作频率低于100 kHz^[27],采用107.3 kHz的红外脉冲频率可以降低来自无影灯干扰的可能性,且不会产生干扰

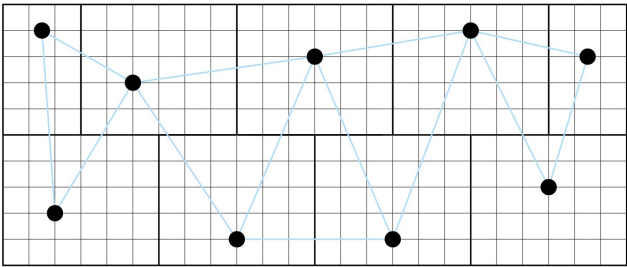


图4 二维光源分布
Figure 4 Two-dimensional light source distribution

红外接收器工作频率的谐波。当示踪装置的近红外接收器检测到红外脉冲时,触发工具的系统微控制器,激活NIR-ED标志阵列,同时光电二极管发出可见光,提醒使用者导航开始,避免医护人员中途遮挡双目相机到示踪装置之间的视线。然后,双目相机开始识别和跟踪示踪面,并计算出装置的位置与方向。

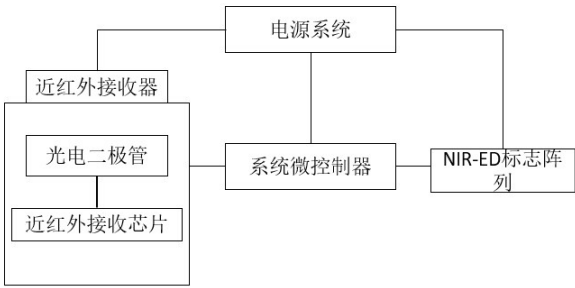


图5 示踪装置电路框图
Figure 5 Circuit block diagram of the tracer equipment

2 仿真分析与建模参数

2.1 光源阵列 COMSOL Multiphysics 仿真

利用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 对装置的光源阵列进行仿真。(1)通过 Solidworks 建立示踪装置的简易模型,导入 COMSOL;(2)在几何光学物理场中,将模型的介质属性选择所有域,且折射率为各向同性,射线属性的真空波长 $\lambda_0=2\ 000\ \text{nm}$,壁的边界条件设置为一般反射射线;(3)光源射线按照阵列排布,在几何模型上选择从栅格释放,射线方向矢量选择锥形且均匀密度分布,锥轴 r 为该光源装置面法线方向,波矢空间射线数 $N_w=500$,锥角 $\alpha=2(\pi/3)\text{rad}$;

(4)软件自动构建物理场控制网格;(5)进行研究设置:时步指定为最大路径长度,单位 m ,定义方法为步长,起始为 $0\ \text{m}$,步长 $0.1\ \text{m}$,停止于 $2.0\ \text{m}$,进行射线追踪计算,得到射线轨迹,如图6所示。通过模拟计算的结果,可观察到装置的红外射线轨迹,用不同深度的红蓝渐变表示射线传播距离,通过分析可以得到装置覆盖的范围可达到 256° ,在现实应用中需要至少一个阵列被双目相机捕捉,实际的覆盖范围会小于仿真范围。

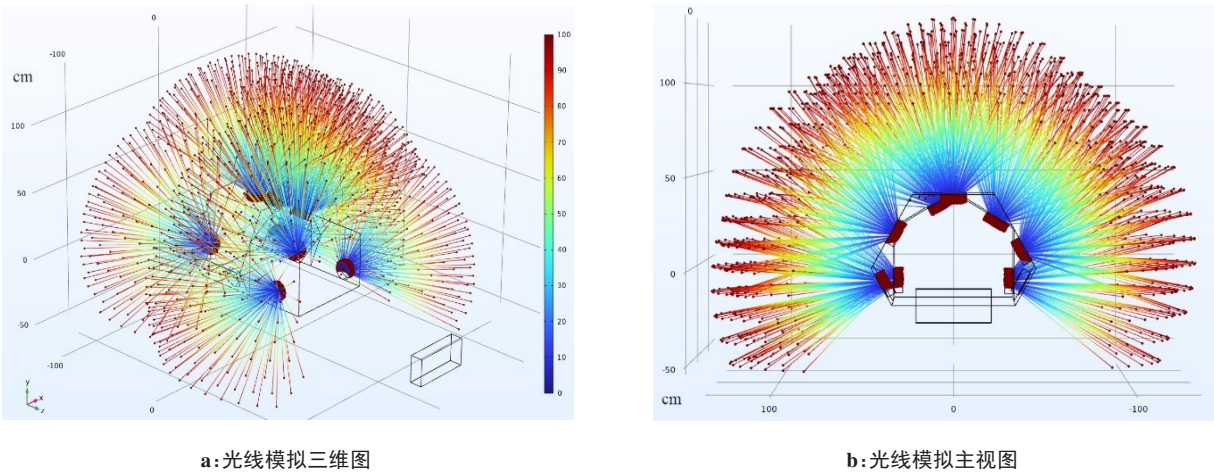


图6 光源射线轨迹
Figure 6 Light source ray trajectory

2.2 末端示踪装置的位姿解算

机器人的位姿解算需要得到机器人末端执行器坐标系和相机坐标系之间的变换关系。导航系统中,双目相机对标志点进行识别跟踪,根据相关约束对示踪装置的工具中心点进行定位,并反馈空间信息。其系统原理示意图如图7所示,其中世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 为所在空间的三维坐标系,通过刚体变换得到以相机为原点的坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$,通过透视投影转变为图像平面坐标系 $o-xy$,该坐标系为以成像图片中心点为原点的坐标系,通过离散和偏移得到像素坐标系 $O-VZ$,该坐标系以图片左上角像素点为原点的坐标系。

左右两相机平行配置,采集空间中的同一物体,得到对应的两幅图像,根据图7双目模型中对应坐标的关系,反向推导出该位置在现实空间的坐标点。通过坐标系间的矩阵变换,世界坐标系与像素坐标系在任意点的关系变换计算公式如式(1)所示:

$$Z_c \begin{bmatrix} U \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = K[R \ t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

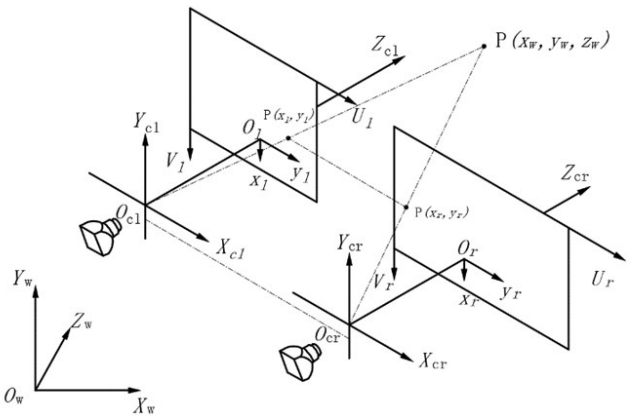


图7 双目相机原理图
Figure 7 Schematic diagram of binocular cameras

其中, f 表示相机的焦距; f_x 和 f_y 表示在 x 轴与 y 轴方向上有 f_x 和 f_y 个像素; c_x 和 c_y 表示图像坐标系原点在像素坐标系下的坐标; K 为相机内参矩阵; R 、 t 代表摄像机的外参矩阵。

使用机器人代替医生完成导航操作时,还需要系统计算位姿信息。其中, O_{TCP} 为手术工具中心点坐标系, O_{ME} 为多角度末端示踪装置坐标系, O_c 为双目

相机坐标系, O_M 为目标标志物坐标系, O_P 为目标病灶的 CT 图像坐标系。上述坐标系之间的转换关系如下: T_C^{ME} 是多角度末端示踪装置坐标系与双目相机坐标系的变换矩阵, 通过双目相机实时获取; T_{ME}^{TCP} 是手术工具中心点坐标系与机械臂多角度末端示踪装置坐标系的变换矩阵, 可通过手眼标定计算获取; T_C^M 是目标标志物坐标系与双目相机坐标系的位姿变换矩阵, 可以经过双目相机实时反馈给控制系统; T_M^P 是目标病灶的 CT 图像坐标系相对目标标志物坐标系的位姿变换矩阵, 可以通过图像配准获取。坐标系变换关系如图 8 所示。

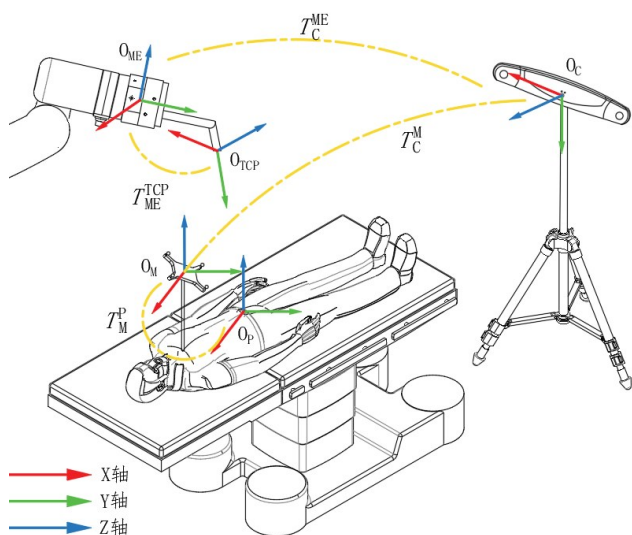


图8 坐标系变换关系图

Figure 8 Coordinate transformation

根据链式法则, 双目相机坐标系到机器人工具中心点的坐标变换矩阵可由式(2)求出:

$$T_C^{TCP} = T_C^{ME} T_{ME}^{TCP} \quad (2)$$

从双目相机坐标系到病灶坐标系的坐标变换矩阵可由式(3)求出:

$$T_C^P = T_C^M T_M^P \quad (3)$$

从机器人工具中心点坐标系到病灶坐标系变换矩阵可由式(4)求出:

$$T_{TCP}^P = T_C^{TCP^{-1}} T_C^P \quad (4)$$

矩阵 T_{TCP}^P 可以指导机械臂运动, 将机械臂的工具中心点从初始位置移动至病灶位置, 进而完成导航。

3 实验验证与分析

通过加拿大北方数字公司生产的光学测量系统 Polaris Vega 进行覆盖范围和静态定位两种测试来验证装置的信号范围和稳定性。首先, 将本文设计的装置和未改进的示踪球对比, 通过双目相机识别比较两种装置红外信号的覆盖范围; 其次, 静态定位测

试用于验证装置的鲁棒性, 通过将标准面重复移动测量装置中心坐标, 记录平面移动距离的变化以比较定位精度。一般采用均方根误差 (RMSE) 来衡量, 它的表达式如下所示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{ref})^2}{n}} \quad (5)$$

3.1 覆盖范围验证

光学系统进行跟踪时, 必须具有足够的信号覆盖范围。通过系统对主动光源示踪装置和反光示踪球进行识别追踪, 验证装置的信号覆盖范围。实验将两个装置分别安装在手术机械臂上, 运行机械臂末端执行器的关节, 保证相机和示踪装置之间没有遮挡, 机械臂旋转一周, 收集两个装置被系统识别时的角度, 即为装置信号的范围。为覆盖手术的操作区域, 在距离双目相机 1.1、1.5 和 2.0 m 处进行机械臂的转动, 离地高度分别为 60、90 和 120 cm, 且在相机光轴及其左右两侧 45° 都进行测试, 共计 27 个位置, 多次测量取平均值, 得到数据, 如图 9 所示。结果表明, 主动光源示踪装置和被动示踪小球在不同位置的信号覆盖范围为 222.87° 和 164.50°, 符合仿真结果和实验设想。多角度示踪装置在 1.1~2.0 m 区间范围内信号覆盖范围均大于示踪小球, 平均信号覆盖范围增加 58.37°。实际使用时应按手术需求合理设置距离, 在垂直方向上不严重偏离光轴时, 1.1~1.5 m 处示踪装置的信号覆盖范围相比于 2.0 m 更广。

3.2 静态定位验证

手术机器人通过操纵机械臂、末端执行装置和其他器械完成手术操作。如果控制不稳定, 可能会导致手术过程中精度下降, 出现偏差, 甚至对患者造成损伤。因此, 静态定位的验证是确保机器人准确性和安全性的重要一环。在静态定位实验中, 以装置前端面为标准面重复移动, 测量装置中心点坐标, 通过计算测量值和实际值的变化, 从而验证系统静态定位时的稳定性。随机选取 10 个位置, 共采集 613 组数据, 分别计算各个方向的 RMSE, 结果如图 10 所示。分析结果可知, 装置在静态定位实验中 X、Y 和 Z 方向的平均 RMSE 分别为 0.383、0.209、0.266 mm, 平均标准差分别为 0.052、0.024 和 0.040 mm。它们涵盖了装置的系统振动误差, 实际值应该更小, 在合理的范围内, 这意味着装置的静态定位精度准确且具有稳定性, 可以满足手术机器人的使用要求。

4 结论

本文提出一种基于双目视觉原理的多角度、广范围的手术机器人光学示踪装置。结合主动发光的近红外光源, 减少了环境产生的干扰因素; 装置通过

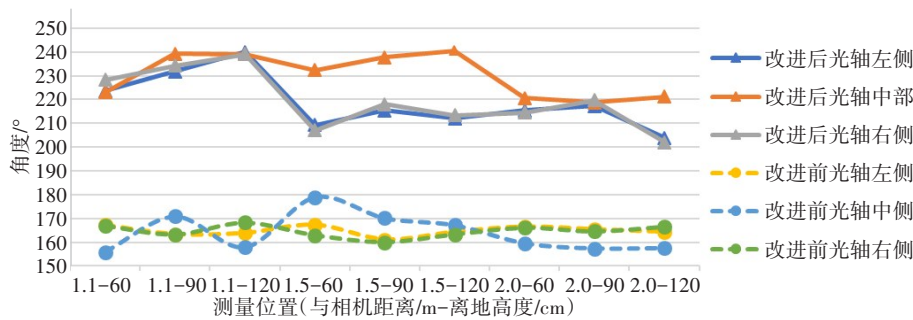


图9 改进前后不同位置的信号角度

Figure 9 Signal angles at different positions before and after improvement

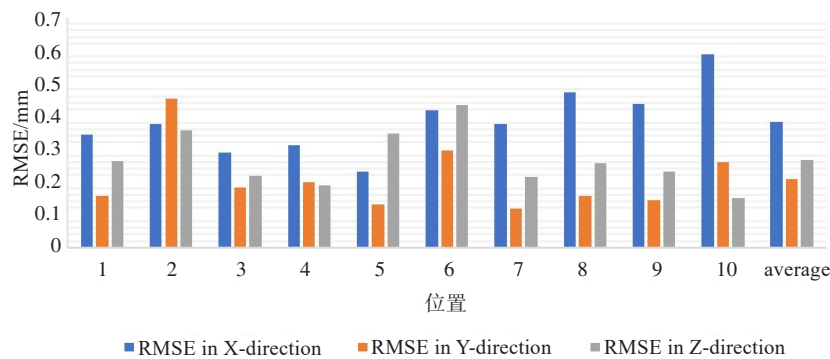


图10 装置稳定性实验

Figure 10 Stability experiment results

设置多角度的光源阵列,产生较广范围的红外信号,减少了在特殊术中造成的示踪信号丢失的问题;与传统示踪小球支架式的结构不同,自主设计的装置与手术机械臂集成,其特殊的机械结构可以规避掉标志点互相干涉的情况。实验结果表明:该装置具有较广的覆盖范围和较高的稳定性,满足临床的精度需求,初步证实了多角度主动光源示踪装置的可行性,可为复杂手术进行精准的导航。

【参考文献】

[1] 朱振中, 郑国焱, 张长青. 机器人辅助技术在创伤骨科的发展与临床应用[J]. 中国修复重建外科杂志, 2022, 36(8): 915-922.
Zhu ZZ, Zheng GY, Zhang CQ. Development and clinical application of robot-assisted technology in traumatic orthopedics [J]. Chinese Journal of Prosthetic and Reconstructive Surgery, 2022, 36(8): 915-922.

[2] Balicki M, Kyne S, Toporek G, et al. Design and control of an image-guided robot for spine surgery in a hybrid OR[J]. Int J Med Robot, 2020, 16(4): e2108.

[3] Dai Y, Xue Y, Zhang J. Human-inspired haptic perception and control in robot-assisted milling surgery[J]. IEEE Trans Haptics, 2021, 14(2): 359-370.

[4] Li W, Li G, Chen W, et al. The safety and accuracy of robot-assisted pedicle screw internal fixation for spine disease[J]. Bone Joint Res, 2020, 9(10): 653-666.

[5] Peng YN, Tsai LC, Hsu HC, et al. Accuracy of robot-assisted *versus* conventional freehand pedicle screw placement in spine surgery: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Ann Transl Med, 2020, 8(13): 824.

[6] Fatima N, Massaad E, Hadzipasic M, et al. Safety and accuracy of

robot-assisted placement of pedicle screws compared to conventional free-hand technique: a systematic review and meta-analysis[J]. Spine J, 2021, 21(2): 181-192.

[7] Han X, Tian W, Liu Y, et al. Safety and accuracy of robot-assisted *versus* fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery: a prospective randomized controlled trial [J]. J Neurosurg Spine, 2019, 30(5): 615-622.

[8] De Biase G, Gassie K, Garcia D, et al. Perioperative comparison of robotic-assisted *versus* fluoroscopically guided minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion[J]. World Neurosurg, 2021, 149: e570-e575.

[9] Zhang Q, Han XG, Xu YF, et al. Robot-assisted *versus* fluoroscopy-guided pedicle screw placement in transforaminal lumbar interbody fusion for lumbar degenerative disease[J]. World Neurosurg, 2019, 125: e429-e434.

[10] Lioumakos JI, Kumar V, Jamshidi A, et al. Reduction in complication and revision rates for robotic-guided short-segment lumbar fusion surgery: results of a prospective, multi-center study [J]. J Robotic Surg, 2021, 15: 793-802.

[11] Lee NJ, Leung E, Buchanan IA, et al. A multicenter study of the 5-year trends in robot-assisted spine surgery outcomes and complications[J]. J Spine Surg, 2022, 8(1): 9-20.

[12] 杨丽晓, 侯正松, 唐伟, 等. 近年手术机器人的发展[J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47(1): 1-12.
Yang LX, Hou ZS, Tang W, et al. Development of surgical robots in recent years[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2023, 47(1): 1-12.

[13] 张春雷, 戴丽, 刘宇, 等. 基于三点法和ICP算法的手术导航系统患者配准[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(11): 1584-1590.
Zhang CL, Dai L, Liu Y, et al. Patient registration for surgical navigation systems based on three-point method and ICP algorithm[J]. Journal of Northeast University (Natural Science), 2020, 41(11): 1584-1590.

[14] 滕潇. 基于视觉与阻抗的辅助手术系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
Teng X. Research on surgical assistant system based on vision and

- impedance[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [15] 黄煜, 黄翔, 李浣果, 等. 存在视场丢失的机器视觉精度补偿方法[J]. 工程科学学报, 2018, 40(3): 381-388.
Huang Y, Huang X, Li LG, et al. Compensation method for a robot vision system with an occluded camera field[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(3): 381-388.
- [16] Bhandari M, Zeffiro T, Reddiboina M. Artificial intelligence and robotic surgery: current perspective and future directions[J]. Curr Opin Urol, 2020, 30(1): 48-54.
- [17] 冯朋飞, 李亮, 丁辉, 等. 基于深度学习的手术机器人单目视觉患者头部姿态估计[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 41(5): 537-546.
Feng PF, Li L, Ding H, et al. Head pose estimation of patients with monocular vision for surgery robot based on deep learning[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2022, 41(5): 537-546.
- [18] 李天梁, 宋珍珍, 陈发银, 等. 光纤光栅与人工智能融合的形状自感知穿刺针[J]. 光学精密工程, 2023, 31(2): 160-167.
Li TL, Song ZZ, Chen FY, et al. Fiber Bragg grating and artificial intelligence fusion for shape self-sensing puncture needle[J]. Optical and Precision Engineering, 2023, 31(2): 160-167.
- [19] 陈泉林, 陈琳, 王彬晨, 等. 红外光学定位动态导航技术在口腔种植领域应用的研究进展[J]. 实用口腔医学杂志, 2022, 38(5): 570-577.
Chen QL, Chen L, Wang BC, et al. Application of infrared optical positioning dynamic navigation technology in implant surgery[J]. Journal of Practical Stomatology, 2022, 38(5): 570-577.
- [20] Zhou Z, Wu B, Duan J, et al. Optical surgical instrument tracking system based on the principle of stereo vision[J]. J Biomed Opt, 2017, 22(6): 65005.
- [21] 庄晓军. 二维计算机导航辅助与传统常规透视在胸腰椎椎弓根螺钉内固定中的临床对比分析[D]. 福州: 福建医科大学, 2021.
Zhuang XJ. Comparison of the clinical effect of two-dimensional computer navigation assisted and traditional fluoroscopy in thoracolumbar pedicle screw placements[D]. Fuzhou: Fujian Medical University, 2021.
- [22] Bi S, Gu Y, Zhang Z, et al. A fast feature point extraction method for optical tracking system[C]//2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC). 2021: 1-5.
- [23] Yu Z, Li S, Hu Y, et al. Switching fluctuation compensation of the multi-view optical positioning system under camera occlusion[C]//2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). 2021: 1164-1169.
- [24] Bi S, Gu Y, Zou J, et al. High precision optical tracking system based on near infrared trinocular stereo vision[J]. Sensors, 2021, 21: 2528.
- [25] 况雪兵. 基于全生命周期理论的手术器械设计[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Kuang XB. Design of surgical instruments based on life cycle theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [26] 张琥, 曾昭宇, 程弓, 等. 达芬奇手术机器人从引进到使用过程中的科学管理[J]. 北京生物医学工程, 2021, 40(1): 101-104.
Zhang H, Zeng ZY, Cheng G, et al. Scientific management of the introduction of Da Vinci surgical robot into the use process[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2021, 40(1): 101-104.
- [27] Ishida K, Oshida TY, Arie S, et al. Study of electromagnetic noise radiated from LED shadowless lighting and its effect on surgical navigation system [C]//2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC EUROPE). 2018: 866-869.

(编辑: 陈丽霞)