

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2023.11.010

医学信号处理与医学仪器

快速迭代自适应阈值最近点迭代血管介入手术系统配准方法

孙昊悦, 胡陟, 齐金龙, 崔国华

上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201620

【摘要】针对增强现实血管介入手术系统中,柔性导丝在血管中运动时位姿动态变化影响主-从位姿配准精度及迭代效率低下的问题,提出一种快速迭代自适应阈值最近点迭代(ICP)算法。首先通过建立血管和导丝物理模型,获取运动点位置数据。然后充分考虑迭代中系统状态的变化,通过对主手端和从手端点的重叠率进行判断,设计自适应动态阈值ICP算法进行精配准,提高配准精度。同时快速选点迭代,提高配准效率。最后进行仿真模拟,与经典ICP算法进行对比分析。结果表明,本研究提出的动态高精度配准算法能将配准速度和精度分别提高57%和70%。该方法能提高配准方法的动态特性,抑制术中导丝形态变化对配准精度及配准效率的影响,更加适合增强现实血管介入手术情况。

【关键词】血管介入手术;最近点迭代;动态配准;自适应阈值;快速选点

【中图分类号】R318;TP242.3

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)11-1377-06

A fast iterative registration method based on iterative closest point algorithm with adaptive thresholds for vascular intervention

SUN Haoyue, HU Zhi, QI Jinlong, CUI Guohua

School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: A fast iterative registration method based on iterative closest point (ICP) algorithm with adaptive thresholds is proposed for the vascular intervention system based on augmented reality to overcome the challenge that the accuracy of master-slave registration is affected by the dynamic change of the position when the flexible guidewire moves in the vessel and to address the problem of iteration inefficiency. The physical model of blood vessel and guidewire is established to obtain the position data of the motion points. After fully considering the change of system state during the iteration, the ICP algorithm with adaptive thresholds is designed to achieve precise registration by calculating the overlapping rate of the master and slave points, thereby improving the registration accuracy. Meanwhile, the fast point selection iteration improves the registration efficiency. The simulation is carried out for performance comparison with the classical ICP algorithm, and the results show that the dynamic high-precision registration algorithm proposed in the study can improve the registration speed and accuracy by 57% and 70%. The proposed method is more suitable for augmented reality-based vascular interventions for it can enhance the dynamic characteristics of the registration method and suppress the effects of the morphological changes of the guidewire during the surgery on the registration accuracy and efficiency.

Keywords: vascular interventional surgery; iterative closest point; dynamic registration; adaptive threshold; fast point selection

前言

随着社会生活水平的提高和工作节奏的加快,心脑血管疾病已成为威胁中老年人健康和长寿的第一号杀手。血管介入手术是治疗心脑血管疾病的主

要方式^[1]。与传统血管介入手术相比,基于增强现实的血管介入手术机器人系统为医生提供更逼真的手术环境以及患者详细的病灶数据^[2-3]。术中医生在主手端操作手控器,引导从手端导丝在病人血管中进行手术。如何保证主手端导丝位姿与从手端导丝位姿的一致,即位姿配准,是进行基于增强现实的血管介入手术的关键科学问题^[4-5]。最近点迭代(Iterative Closest Point, ICP)算法是目前使用最为广泛且最为经典的三维配准算法,其由 Besl 等^[6]在 1992 年首次提出,因其具有较高的配准精度及配准速度,被广泛应用于现代医疗手术中。李长瑞等^[7]利用 ICP 算法

【收稿日期】2023-06-21

【基金项目】国家自然科学基金青年项目(62003207);国家重点研发计划(2019YFC0119303)

【作者简介】孙昊悦,硕士,研究方向:医用介入机器人, E-mail: 1320569824@qq.com

将断骨近心端模型与健侧骨镜像模型进行配准,从而实现虚拟断骨模型和真实断骨模型的同步移动。Wu等^[8]提出一种改进的ICP算法,将医学图像与患者的配准误差控制在3 mm内。Zhou等^[9]提出一种混合现实导航系统,利用ICP算法帮助医生在近距离放射治疗手术中更快速、更准确地定位针头。顾菊平等^[10]提出一种基于颅骨几何特征不变量的ICP算法,大大降低了迭代复杂度,显著提高了配准速度。上述研究主要是基于几何模型的三维配准,然而在基于增强现实的血管介入手术中,配准过程需要考虑柔性导丝在血管中运动时的状态变化,上述配准方法对于血管介入手术来说具有局限性^[11]。

本研究对ICP配准方法进行改进,结合柔性导丝在血管中的运动变化情况,将重合点数与迭代点总数作为加权,设计自适应动态阈值,并采用快速选点迭代法,实现选取最近点方向上的快速搜寻点迭代,在保证配准精度的同时提高迭代速度。

1 基于增强现实的血管介入手术机器人系统

基于增强现实的血管介入手术机器人系统如图1所示^[12]。系统分为主手端和从手端两部分,使用网络进行通信。从手端的机械臂把持和操作导丝等介入器械,其位移和力的数据传输到主手端。医生则通过主手端的物理模型产生的力觉信息的引导进行手术操作^[13]。当主手端跟从手端的位移和力数据存在误差时,需要对主手端物理模型进行配准,提高力觉信息的准确性^[14]。因此设计准确高效的模型配准方法对实现基于增强现实的血管介入手术具有重要意义^[15]。

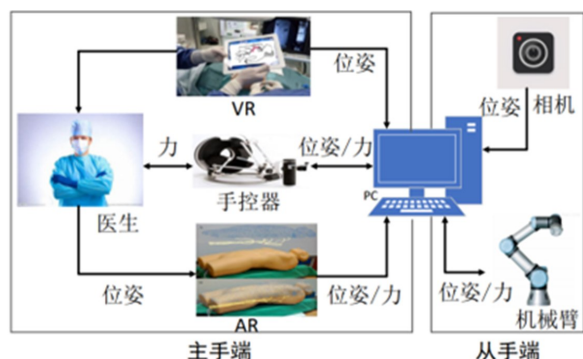


图1 基于增强现实的血管介入手术系统

Figure 1 Vascular intervention system based on augmented reality

2 导丝物理建模及运动点集获取

导丝是血管介入手术中常用的一种手术器械,用于在血管内导航和引导其他器械,如导管、球囊

等。构建导丝物理模型的常用方法有弹簧质点建模方法^[16]、有限元建模方法^[17]和弹性杆建模方法^[18]等。

在血管介入手术中,导丝随着医生的操作由静止状态进入运动状态。因此,在构建导丝物理模型时,需要考虑到导丝的弯曲和扭转能力。弹性杆模型可以有效计算导丝的弯曲和扭转,也能够模拟导丝与血管壁之间的接触碰撞,因此在复杂的接触模拟中表现出色^[19]。

本文采用质点弹簧法对主手端血管进行建模,将血管整体的质量分散到一个个质点上,每个质点与弹簧相连^[20]。质点的大小和数量可根据实际情况进行调整,以避免血管几何模型因包含大量顶点而计算量大的问题,模拟导丝的弯曲扭转则采用弹性杆建模方法,如图2所示。

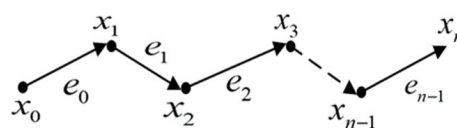


图2 弹性杆模型

Figure 2 Elastic rod model

图2中, n 表示为导丝模型的离散节点数,离散节点 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ 将连接线段表示为 $e_0, e_1, e_2, \dots, e_{n-1}$,满足 $e_{i-1} = x_i - x_{i-1}$ 。在导丝介入血管的过程中,本文为导丝的每个节点设置一个变形前位置坐标和一个变形后位置坐标。令 $u_i^k, x_i^k, v_i^k, a_i^k \in R^3$ 为第 i 个节点在时间步长 k 时的变形前位置坐标、变形后位置坐标、速度和加速度。导丝各个运动节点位置获取过程如下。

x_i^k, v_i^k 为导丝某处节点 i 在 k 时刻处的位移和速度, $x_i^k \in R^{3n}, v_i^k \in R^{3n}$ 。则节点在下一时刻 $k+1$ 处的位移和速度可以表示为:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \Delta t v_i^k + \Delta t^2 \left(\left(\frac{1}{2} - \beta \right) a_i^k + \beta a_i^{k+1} \right) \quad (1)$$

$$v_i^{k+1} = v_i^k + \Delta t ((1 - \gamma) a_i^k + \gamma a_i^{k+1}) \quad (2)$$

其中, $0 \leq \beta \leq 1, 0 \leq \gamma \leq 1, a_i^{k+1}$ 为加速度,并有:

$$F(x_i^{k+1}, v_i^{k+1}) = M a_i^{k+1} \quad (3)$$

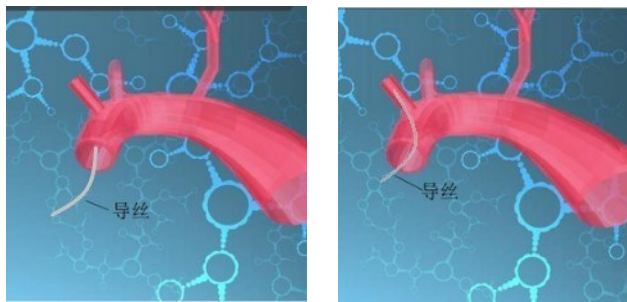
基于牛顿-拉夫森法可得:

$$F(x_i^k, v_i^k) + \frac{\partial F}{\partial x} (x_i^{k+1} - x_i^k) + \frac{\partial F}{\partial v} (v_i^{k+1} - v_i^k) \approx M a_i^{k+1} \quad (4)$$

其中, $\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial v} \in R, R^{3n \times 3n}$ 分别为力关于位置和速度的雅可比矩阵,可由 (x^k, v^k) 求出。将式(1)和式(2)代入式(4)中,可得到 $a_i^{k+1}, x_i^{k+1}, v_i^{k+1}$ 的具体数值。

导丝在与血管接触后发生受力形变,基于弹性杆模型可得导丝运动节点的实时位置,实现导丝的

形变位姿变化模拟。本文基于Chai-3D平台,对血管及导丝进行物理建模,如图3所示。

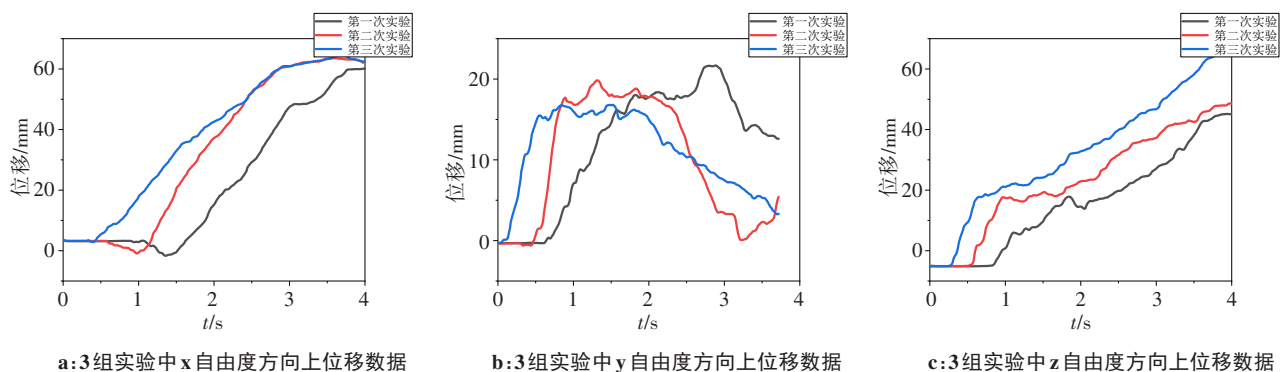


a: 导丝进入血管

b: 导丝在血管中弯曲扭转

图3 导丝在血管中的形态变化

Figure 3 Morphological changes of the guidewire in blood vessels



a: 3组实验中x自由度方向上位移数据

b: 3组实验中y自由度方向上位移数据

c: 3组实验中z自由度方向上位移数据

图4 导丝在血管中位移数据图

Figure 4 Data plots of the displacements of the guidewire in blood vessels

基于物理模型获取主手端虚拟三维坐标系下的中心线数据即主手端导丝模型点集 Q , $Q = \{Q_i | Q_i \in R^3, i = 1, 2, \dots, n\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。通过位姿传感器实时获取从手端实际坐标系下的导丝路径数据即从手端导丝位置点集 P , $P = \{P_i | P_i \in R^3, i = 1, 2, \dots, n\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。

寻找从手端导丝位置点集 P 中某一点 \vec{p} 到主手端血管中心线点集 X 中对应点的最小距离 d :

$$d(\vec{p}, X) = \min_{\vec{x} \in X} \|\vec{x} - \vec{p}\| \quad (5)$$

点集 P 中的某一点 \vec{p} 对应 X 中用 \vec{q} 表示,则可得 $d(\vec{p}, \vec{q}) = d(\vec{q}, X)$ 。导丝运动路径中的任意一个位置点,都能够主手端的中心线点集中搜寻到与其距离最小的点^[23]。将最小距离对应点用新集合 Q 表示,可得到 $Q = C(P, X)$,其中 C 为搜寻最小距离对应点的方法。由此得到新的对应点对集合 $P = \{\vec{p}_i\}$ 和 $Q = \{\vec{q}_i\}$ 。

本文使用力反馈设备-Omega.7操作导丝^[21],定义采样周期为10 ms。经过3组实验操作获取到的 x 、 y 、 z 3个自由度的位移数据如图4所示。本文进行3组实验操作,将 x 、 y 、 z 3个自由度位移数据变化进行对比分析。由图4可以看出,3组操作实验中,3个自由度的数据变化趋势基本一致,实验结果具有规律性。基于该数据,可进行相关的配准研究。

3 主-从配准方法及其自适应性改进

3.1 传统ICP配准方法

如图5所示,本文通过对从手端导管路径点 q_i 和主手端血管中心线位置点进行反复迭代计算,搜寻其最近对应点 p_i ,计算转换矩阵,完成主从配准^[22]。

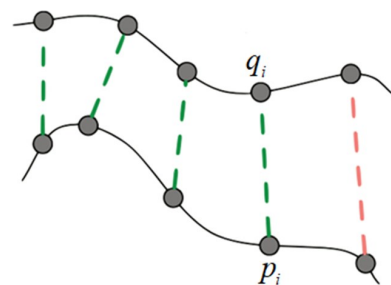


图5 最近点搜索

Figure 5 Closest point search

以下为旋转矩阵和平移向量获取流程:

(1) 计算点集 Q 和点集 P 的旋转矩阵 R^k 和平移向量 T^k ,使

$$\sum_{i=1}^n \|R^k P_i^k + T^k - Q_i^k\| = \min \quad (6)$$

(2) 计算 $P^{k+1} = \{P_i^{k+1} | P_i^{k+1} = R_i^k P_i^k + T_i^k, i = 1, 2, \dots, n\}$, P^{k+1} 为点集 P 在第 $k+1$ 次迭代的数据, P_i^{k+1} 为点集中具体点 P_i 在第 $k+1$ 次迭代的数据, R_i^k

为 \mathbf{R}^k 中第 i 个点的旋转矩阵, \mathbf{T}_i^k 为 \mathbf{T}^k 中第 i 个点的平移向量。

(3)计算主手端导管模型点集和从手端导管模型点集中每一个点的位置误差平均值 $d^{k+1} = (\sum_{i=1}^n \|P_i^{k+1} - Q_i^k\|)/n$ 。

(4)判断 $\|d^{k+1} - d^k\| < \tau$ 是否成立, d^k 和 d^{k+1} 分别为第 k 和 $k+1$ 次迭代的位置误差平均值, τ 为迭代阈值。若成立,则输出最后一次迭代时的 \mathbf{R}^k 和 \mathbf{T}^k ,作为初步配准的旋转矩阵和平移向量;反之,则返回步骤(1)。

传统配准算法若迭代阈值 τ 过小,前期效率低;若迭代阈值过大,则存在精度不够的问题^[24]。与此同时,传统ICP搜寻最近点为逐点选取,存在计算速度较慢的问题^[25]。

3.2 快速迭代自适应阈值方法

通过判断理想配准完成的点数比例,对收敛阈值自适应调整,以提高配准精度。理想配准完成的点数据中每个理想匹配的对应点都位于半径为 $\sqrt{2}L/2$ 的圆内。其中 L 为系统模型中水平分辨率。在配准中,重合点数越多,配准的误差值就会越小,因此可以利用重合点数总数的比例即重叠率^[26]作为加权。令

$$N = N_p/N_q \quad (7)$$

其中, N_p 和 N_q 分别表示重合点数和迭代点总数。自适应迭代阈值设置为:

$$\tau = (1 - N) \sqrt{2} L/2 \quad (8)$$

使用快速选点迭代方法,根据配准误差实时调整搜寻迭代点,提升迭代速度。即在进行迭代点搜索时,实现选取最近点方向上快速搜寻方法寻找最近点。设选择点为距离当前位置的第 n 个点。

$$n = \text{INT}(l/\alpha) \quad (9)$$

其中,INT为取整函数, n 为不超过实数 l/α 的最大整数。 l 为离理想点的距离, α 为调节参数。

优化后的配准算法与第3.1小节中传统ICP方法相比,改进如下:(1)搜索对应点对,使用快速搜寻方法寻找最近点,输入初始配准得到变换参数;(2)同时计算重叠率,由式(8)可知变换后的点与原点的平均距离应小于自适应收敛阈值。

本文提出的方法相比传统ICP算法具有自适应调整收敛阈值的功能,使数据的配准更加准确,同时快速搜寻迭代点,具有更高的配准效率。

4 仿真实验

使用Matlab软件进行仿真实验,如图4所示,导丝在 x 和 z 方向上的位置变化较大。为了简化导丝在血管

中的运动过程,将 x 和 z 方向的位置作为实验对象。其中 x 和 z 方向的位移变化趋势分别为: $x=15t, z=12.5t$ 。将从手端 x, z 方向在初始时刻的旋转角度误差设置为 0.1° ,平移误差设置为 0.2 mm 。迭代周期同采样周期设置为 10 ms 。模拟迭代过程中,重合点比例由0逐步增大。取 $L=0.001$,图6为使用正弦函数模拟的重叠率与阈值自适应变化情况。由图6可知,随着迭代的进行,重叠率逐渐增加,自适应阈值逐渐降低。该方法能够更好地适应迭代过程变化,提高迭代效率和精度。

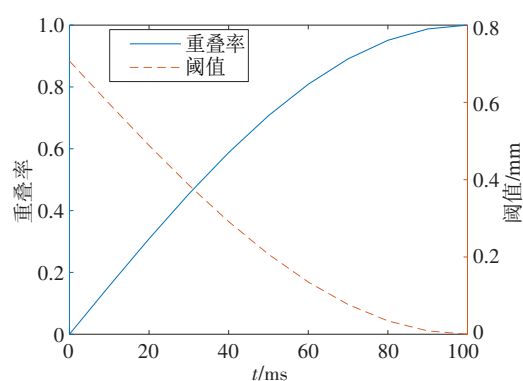


图6 重叠率增大过程中自适应阈值变化
Figure 6 Variations of adaptive threshold as the overlapping rate changes

将使用传统ICP算法进行配准所产生的误差和误差变化率与改进后的方法进行对比。在传统ICP算法中, τ 设置为 0.1 mm 。传统ICP算法进行最近点选取迭代后,位移误差和误差变化率收敛如图7所示。由图7可知,当使用传统的ICP算法经过约 70 ms 的迭代后,迭代误差低于 0.1 mm ,约为 0.085 mm ,同时趋于稳定。误差变化率在 80 ms 达到0。迭代精度和效率均不能达到血管介入手术的标准。

使用快速迭代自适应阈值方法进行配准时,根据式(8)进行迭代阈值自适应调整,根据式(9)快速搜寻方法寻找最近点。位移误差和误差变化率收敛如图8所示。由图8可知,在迭代初期,优化后的配准方法其迭代速度相比传统ICP得到明显加快。位移误差经 30 ms 后即小于 0.1 mm , 50 ms 的迭代后约为 0.03 mm ,相比传统ICP方法迭代速度提升 57% ,精度提升约为 70% 。迭代精度和效率都得到明显的提升。

仿真结果表明本文提出的动态ICP配准方法相比传统ICP方法,能够进行实时调整搜寻迭代点,快速进行迭代。根据主-从点数重叠率,自适应调整迭代阈值,提升配准精度。在进行基于增强现实的血管介入手术主从端导丝位姿配准时,既保证了配准速度也保证了精度。

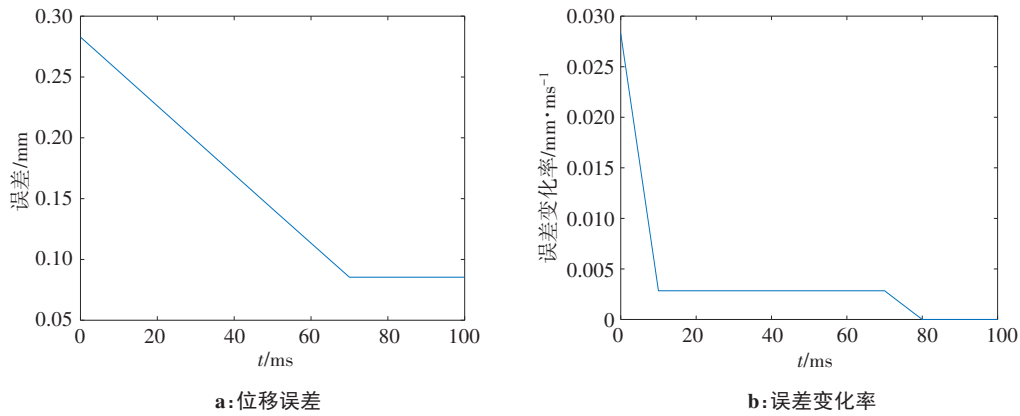


图7 传统ICP迭代效果

Figure 7 Error and its change rate after the classical ICP iteration

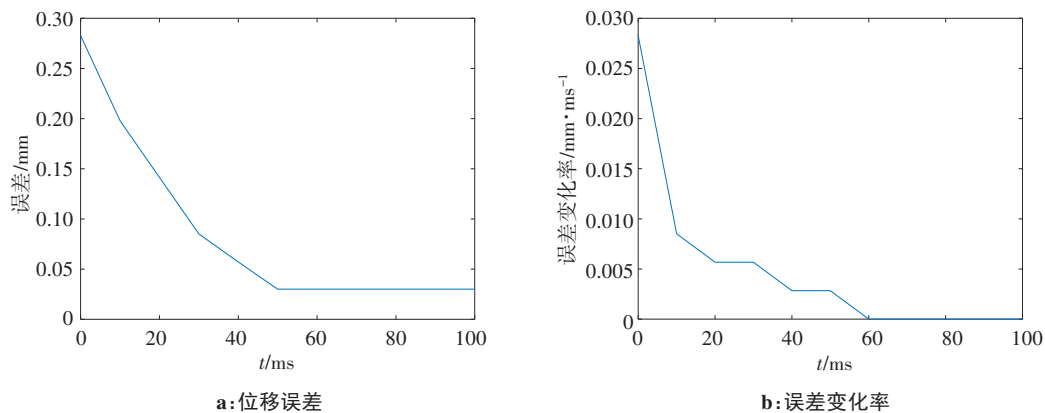


图8 快速迭代自适应阈值ICP迭代效果

Figure 8 Error and its change rate after fast iteration based on ICP with adaptive thresholds

5 结论

本文为了满足血管介入手术对配准精度和传输速度的要求,提高增强现实系统的配准动态特性,对ICP算法进行改进。通过快速搜寻迭代点方法,提高迭代效率,与此同时充分考虑迭代状态的变化,通过对重叠率的判断,自适应调整迭代阈值。该方法弥补了传统ICP算法单纯追求主手端和从手端配准最近点而导致的动态性不足的缺陷,并通过仿真实验验证本文方法的可行性。

【参考文献】

- [1] 何昊, 叶子健, 舒畅. 血管介入手术机器人系统关键技术及研发现状[J]. 中国普通外科杂志, 2021, 30(12): 1477-1484.
He H, Ye ZJ, Shu C. Essential techniques and current research situation in robotic endovascular systems [J]. Chinese Journal of General Surgery, 2021, 30(12): 1477-1484.
- [2] 陈铁凝, 康瑞瑞, 朱建军, 等. 基于非线性力反馈的血管介入手术训练系统[J]. 光学技术, 2019, 45(2): 129.
Chen TN, Kang RR, Zhu JJ, et al. Interventional vascular surgery training system based on nonlinear force feedback [J]. Optical Technique, 2019, 45(2): 129.
- [3] Kaneko SI, Nasu Y, Usui S, et al. Development of a teleoperation system and an operation assist user interface for a humanoid robot [M]. WSEAS, 2005.
- [4] Lungu AJ, Swinkels W, Claesen L, et al. A review on the applications of virtual reality, augmented reality and mixed reality in surgical simulation: an extension to different kinds of surgery[J]. Expert Rev Med Devices, 2021, 18(1): 47-62.
- [5] Stewart CL, Fong A, Payyavula G, et al. Study on augmented reality for robotic surgery bedside assistants[J]. J Robot Surg, 2022, 16(5): 1019-1026.
- [6] Besl PJ, McKay ND. Method for registration of 3-D shapes[C]//Sensor fusion IV: Control Paradigms and Data Structures. 1992: 586-606.
- [7] 李长瑞, 蔡向东, 周志, 等. 用于骨折闭合复位的计算机辅助导航方法[J]. 计算机应用, 2021, 41(S1): 211-215.
Li CR, Cai XD, Zhou Z, et al. Computer-aided navigation method for closed reduction of fracture[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(S1): 211-215.
- [8] Wu ML, Chien JC, Wu CT, et al. An augmented reality system using improved-iterative closest point algorithm for on-patient medical image visualization[J]. Sensors, 2018, 18(8): 2505.
- [9] Zhou Z, Jiang S, Yang Z, et al. Surgical navigation system for brachytherapy based on mixed reality using a novel stereo registration method[J]. Virtual Real, 2021, 25(4): 975-984.
- [10] 顾菊平, 程天宇, 王建平, 等. 基于几何特征不变量的快速3D医学图像配准[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(11): 2105-2111.
Gu JP, Cheng TY, Wang JP, et al. Fast 3D medical image registration based on geometric feature invariants [J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(11): 2105-2111.
- [11] 陆卫刚, 周治平. 面向增强现实的点云配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 192803.
Lu WG, Zhou ZP. Point cloud registration algorithm for augmented reality[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 192803.

- [12] 宋爱国. 人机交互力觉临场感遥操作机器人技术研究[J]. 科技导报, 2015, 33(23): 100-109.
Song AG. Research on human-robot interaction telerobot with force telepresence[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(23): 100-109.
- [13] 马志楠, 张雪竹. 血管性轻度认知障碍的潜在生物标志物研究进展[J]. 吉林大学学报(医学版), 2023, 49(4): 1083-1091.
Ma ZN, Zhang XZ. Research progress in potential biomarkers of vascular mild cognitive impairment[J]. Journal of Jilin University (Medicine Edition), 2023, 49(4): 1083-1091.
- [14] 童静, 储呈晨, 李斌. 血管介入手术机器人及其力反馈技术研究进展[J]. 中国普通外科杂志, 2023, 32(6): 915-922.
Tong J, Chu CC, Li B. Vascular interventional surgery robot and its force feedback technology[J]. Chinese Journal of General Surgery, 2023, 32(6): 915-922.
- [15] 袁庆曙, 王若楠, 潘志庚, 等. 空间增强现实中的人机交互技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(3): 321-332.
Yuan QS, Wang RN, Pan ZG, et al. A survey on human-computer interaction in spatial augmented reality[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(3): 321-332.
- [16] 鲍春波, 王博亮, 刘卓, 等. 一种用于软组织变形仿真的动态质点弹簧模型[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 847-851.
Bao CB, Wang BL, Liu Z, et al. A dynamic mass spring model for simulation of soft tissue deformation[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(4): 847-851.
- [17] 黄鹏, 晁建刚. 虚拟介入手术中导管物理建模技术研究进展[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 687-692.
Huang P, Zhao JG. Research progress on physically-based models of guidewire/catheter simulation for virtual intervention[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4): 687-692.
- [18] 林海立, 刘检华, 唐承统, 等. 基于 Cosserat 弹性杆理论的柔性线缆物理建模方法[J]. 图学学报, 2016, 37(1): 35-42.
Lin HL, Liu JH, Tang CT, et al. Physical characteristic oriented modeling for flexible cable harness based on cosserat elastic rod theory[J]. Journal of Graphics, 2016, 37(1): 35-42.
- [19] 胡庆夕, 刘涛, 姚远. 基于增强现实技术的三维交互建模[J]. 计算机工程, 2010, 36(13): 236-238.
Hu QX, Liu T, Yao Y. Three-dimensional interactive modeling based on augmented reality technology[J]. Computer Engineering, 2010, 36(13): 236-238.
- [20] 陈卫东, 陈攀攀, 朱奇光. 基于改进弹簧-质点模型的形变建模及力反馈算法研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2015, 32(5): 989-996.
Chen WD, Chen PP, Zhu QG. Research of feedback algorithm and deformable model based on improved spring-mass model[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2015, 32(5): 989-996.
- [21] 秦欢欢, 宋爱国, 莫依婷, 等. 带有双手力觉反馈的人机交互系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 66-73.
Qin HH, Song AG, Mo YT, et al. Design of human-machine system with two-handed force feedback[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 66-73.
- [22] 李在娟, 付宜利, 高文朋. 基于路径的血管介入手术电磁跟踪的配准算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(S1): 316-319.
Li ZJ, Fu YL, Gao WP. Path-based registration method of vascular interventional surgery[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2013, 41(S1): 316-319.
- [23] 王明军, 易芳, 李乐, 等. 自适应局部邻域特征点提取和匹配的点云配准[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 20210342.
Wang MJ, Yi F, Li L, et al. Local neighborhood feature point extraction and matching for point cloud alignment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 20210342.
- [24] 王珊, 王春阳. 基于特征点匹配的三维点云配准算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12): 23-28.
Wang S, Wang CY. Three-dimensional point cloud registration algorithm based on feature point matching[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(12): 23-28.
- [25] 彭真, 吕远健, 渠超, 等. 基于关键点提取与优化迭代最近点的点云配准[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 68-79.
Peng Z, Lü YJ, Qu C, et al. Accurate registration of 3D point clouds based on keypoint extraction and improved iterative closest point algorithm[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 68-79.
- [26] 张顺利, 徐艳芝, 周明全, 等. 基于自适应邻域匹配的点云配准方法[J]. 计算机学报, 2019, 42(9): 2114-2126.
Zhang SL, Xu YZ, Zhou MQ, et al. Registration of point clouds based on matching of general adaptive neighborhood[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(9): 2114-2126.

(编辑:陈丽霞)