

CT 引导机器人辅助经皮肺穿刺活检术定位机制

李 博 康晓东 高万春 洪 睿 王亚鸽 张华丽

(天津医科大学医学影像学院 天津 300203)

摘 要 文中提出一种基于 CT 图像引导机器人辅助经皮肺穿刺活检术空间定位的新机制。首先,设计 6 个标记点,并将其同时固定于 CT 检查床,以在硬件上参考定位;其次,在软件上以改进的 D-H 逆向运动算法实现 CT 图像引导机器人进行经皮肺穿刺操作。仿真实验结果表明,使用文中提出的定位机制可有效地保证一次性穿刺成功率。

关键词 机器人辅助系统,D-H 逆向运动算法,经皮肺穿刺活检术

中图分类号 TP242 **文献标识码** A

Robot Aided Lung Biopsy Positioning Mechanism Based on CT Image Guidance

LI Bo KANG Xiao-dong GAO Wan-chun HONG Rui WANG Ya-ge ZHANG Hua-li

(School of Medical Imaging, Tianjin Medical University, Tianjin 300203, China)

Abstract A new spatial localization mechanism based on CT image-guided robot-assisted percutaneous lung biopsy was proposed. Firstly, six marker points are designed and fixed on the CT examination bed at the same time to reference and locate in hardware. Secondly, the improved D-H inverse motion algorithm is used in software to guide the robot to perform percutaneous lung puncture. The simulation results show that the success rate of one-time puncture can be effectively guaranteed by using the location mechanism proposed in this paper.

Keywords Robot assistant system, D-H inverse motion algorithm, Percutaneous lung biopsy

随着医学影像技术和图形图像学的迅猛发展,CT 引导经皮肺穿刺活检术(Transsthoracic core Needle Biopsy, TNB)在临床上的应用已经越来越成熟。传统 CT 引导下经皮肺穿刺的方法需经多次 CT 扫描定位,手术过程会产生大量电离辐射,增加恶性肿瘤的增长转移率;且医生水平良莠不齐,导致术后患者易发生气胸、肺出血等并发症^[1-3]。

CT 引导经皮肺穿刺活检术是在 CT 图像的基础上利用追踪技术进行定位,完成患者注册,手术过程中可为医生展示实时穿刺引导信息,模拟针尖位置,并引导医生按照规划路径进行穿刺^[4]。近年来,基于电磁导航和光学定位的手术导航系统已被应用于经皮肺穿刺活检术中。光学定位系统的特点是利用双目视觉测距原理,运用 2 个或多个摄像机观测目标点,并对相同目标点的 2 幅以上的图像进行计算,从而获得被测物的位置^[5]。光学定位系统是目前市场上定位精度较高的定位系统,但其对操作环境要求高,标定过程复杂而且价格高昂。电磁定位系统的原理是由发射器向空间发射磁场,接收器接收到磁场信息并传输给中间转换元件,从而得到其空间位置信息。与光学定位系统相比,电磁定位系统虽然精度较低,但其造价低,操作和结构简单,并且无光线遮挡,弥补了光学定位系统在价格与操作上的缺陷。Zhang 等通过实验发现,电磁定位系统在穿刺手术环境下能够获得较好的精度,满足手术导航系统的要求^[6]。杨杰等应用 IG4 电磁导航系统

CT 引导下经皮肺穿刺活检术,该系统采用将标记点粘贴于患者体表的方式进行定位,易因患者体表分泌汗液和呼吸运动作用造成标记点移位或脱落,以致定位不准^[7]。

随着机器人辅助系统的逐渐成熟,基于医学影像导航的机器人已被开发并应用于临床^[8],而高精度的手术定位技术是经皮肺穿刺活检术成功的关键。鞠浩等人研制了机器人辅助定位系统以解决脊柱微创外科手术中的高精度定位问题,并依据 D-H(Denavit-Hartenberg)逆向运动算法分析建立了机器人运动学模型^[9],但在此系统中的机器人运动结构过于复杂,算法仍须精简,不适合进行肺部穿刺操作。

本文提出了一种基于 CT 图像引导,机器人辅助经皮肺穿刺活检术空间定位的新机制。该机制在硬件上不再将标记点置于患者体表,改为同时将 6 个标记点固定于 CT 检查床上;算法上应用改进的 D-H 逆向运动算法,实现了 CT 图像引导机器人进行经皮肺穿刺操作。实验结果表明,本文提出的定位机制可较好地保证穿刺精度,尤其可有效保证一次性穿刺成功率,且系统具有较高的鲁棒性。

1 系统工作框架结构与原理

CT 引导机器人辅助穿刺定位系统包括硬件系统和算法系统两部分。硬件系统主要包括计算机控制台、电磁定位系统和穿刺机器人等部分。算法系统主要包括数据读取系统、

本文受天津市自然科学基金重点基金(17JC2DJ32500)资助。

李 博(1987—),男,硕士生,主要研究方向为医学影像技术;康晓东(1964—),男,教授,博士,CCF 高级会员,主要研究方向为医学图像处理、医疗信息系统集成;高万春(1961—),男,副主任医师,主要研究方向为医学影像技术,E-mail:szxfsk789@163.com(通信作者)。

图像处理系统、路径规划系统等模块。CT 引导机器人辅助穿刺定位系统的框架如图 1 所示。

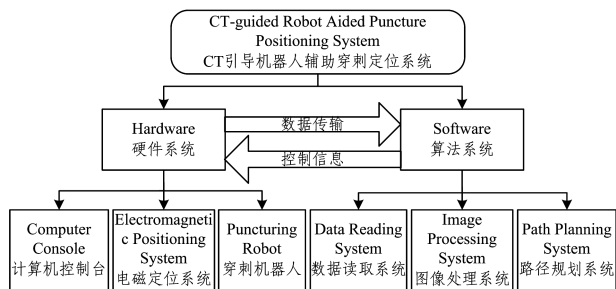


图 1 CT 引导机器人辅助穿刺定位系统的框架

(1) 数据读取系统

数据读取系统的主要功能是:读取 CT 扫描 DICOM 数据,以及画定标记点与穿刺定位点。

系统经导入 DICOM 图像数据后,将在原始的 CT 图像中自动给出 6 个定位点,在后续阶段,系统将初始定位点与电磁定位设备实时读取的位置信息进行匹配,并通过计算得到病灶以及穿刺位置的参考信息。

(2) 图像处理系统

图像处理系统的主要功能是对 CT 图像中的肿瘤及标记点进行识别,以实现图像融合,获得虚拟空间位置信息。

(3) 路径规划系统

路径规划系统允许医生依据临床经验,选择一条最佳穿刺路径。医生可在系统中标注穿刺点,通过计算得出实际空间位置信息,并将此信息换算成穿刺机器人所需的全部关节姿态参数,以引导机器人完成穿刺操作。

(4) 穿刺操作引导系统与穿刺机器人

穿刺操作引导系统引导穿刺机器人进行经皮肺穿刺活检术操作。

当患者进行一次完整胸部 CT 扫描后,医生将 CT 图像传送到机器人来辅助肺穿刺系统的计算机控制台,数据读取系统读取 CT 图像并进行处理,自动检测出出现标记点的图像层面。电磁定位系统探测 6 个标记点的实际物理空间位置信息,并对位置信息初始化。医生依据临床经验,选择 CT 图像中的最佳穿刺进针层面,标定进针方向上与体表的交点 P_1 和进针到病灶中心的位置点 P_2 ,以此规划穿刺路径^[11]。图像处理系统依据 CT 图像测算出进针点 P_1, P_2 相对于某一个标记点在 X, Y, Z 3 个方向上的物理空间距离,由此获得 P_1, P_2 相对于这个标记点的物理空间位置信息,逐次选定每个标记点做计算并取平均值。最后,轨迹规划系统应用改进的 D-H 逆向运动算法,以穿刺针末端位置信息 P_x, P_y, P_z 获得机器人对应于这个位置的全部关节参数,驱动关节上的电机,完成对患者的肺穿刺过程。

穿刺机器人的主要任务是完成移动穿刺针、调整进针姿态、实施穿刺等一系列操作。本文用一台 3 自由度穿刺机器人来完成穿刺进针到取活检的全部操作。该机器人由 2 个转动关节和 1 个垂直移动关节组成,移动关节末端是用于取活检的穿刺针。穿刺机器人的物理坐标系如图 2 所示。其中,物理基坐标系为 $Ox_0Y_0Z_0$,第 1,2 关节的坐标系分别为 $O_1X_1Y_1Z_1$ 和 $O_2X_2Y_2Z_2$ 。采用 D-H 逆向运动算法,由已知穿刺针末端位置和姿态求得机器人对应于这个位置和姿态的全部关节参数,以驱动关节上的电机,使之完成穿刺过程^[9-10]。

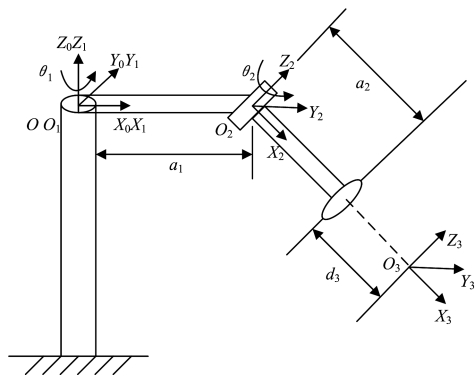


图 2 穿刺机器人机构及坐标系建立示意图

2 CT 引导机器人辅助经皮肺穿刺活检术定位机制

2.1 定位标记方法

在 CT 机检查床上安装 6 个性质相同的标记点,其中任一标记点的样式如图 3 所示。标记点以金属和聚四氟乙烯圆片制成。聚四氟乙烯圆片的直径为 20 mm(图 3 中蓝色部分),圆片核心点 A 为金属磁极,金属磁极的直径为 2 mm(CT 图像中所显影的部分即为核心点 A)。

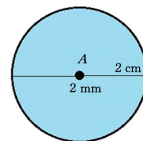


图 3 标记点机构示意图(电子版为彩色)

6 个外观相同的标记点分布于病人卧位时胸部扫描范围内的检查床表面或边缘,使其能够在 CT 图像中显示。当检查床处于适合检查的高度时,保持高度不变,水平退出检查床到达进行穿刺手术的最佳水平床位,并记录 CT 机中显示的水平床位数值 R 。电磁定位系统探测到此时 6 个标记点的实际物理空间位置信息,并对每一个标记点的位置信息进行初始化。病人进行胸部 CT 平扫后,水平退出检查床,回到床位 R 。医生根据临床经验,选择最佳穿刺进针的 CT 图像层面(见图 4),选定进针方向上与体表的交点 P_1 和进入病灶的中心位置点 P_2 。

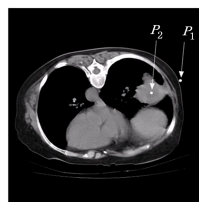


图 4 穿刺进针点 P_1 和 P_2 的图像层面

图像处理系统选定出现某一标记点的图像层面(见图 5),将图 4 与图 5 两个层面中的位置点 P_1, P_2 和标记点按原图中的位置显示于同一图像层面中(见图 6),直接测量就可得到在 X 和 Y 两个方向上 P_1, P_2 两点相对于标记点的实际空间距离 P_x 和 P_y ; Z 轴方向上的距离 P_z 则由两幅 CT 图像间隔的层数与层厚的乘积求出。依据电磁定位系统对此标记点的初始化空间位置,可直接求得 P_1 和 P_2 的实际物理空间位置。

同理,再对依次选定的其他 5 个标记点做类似计算。

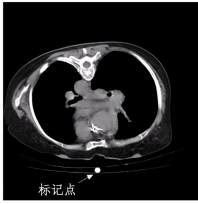
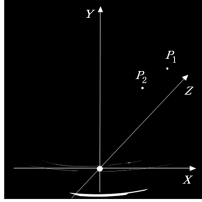


图5 出现某一标记点的图像层面

图6 标记点与 P_1, P_2 的相对空间位置

若依据 6 个标记点得出的 P_x, P_y, P_z 值分别为 $(P_{x1}, P_{x2} \cdots P_{x6})(P_{y1}, P_{y2} \cdots P_{y6})(P_{z1}, P_{z2} \cdots P_{z6})$, 则按照式(1)可分别计算出平均值 $P_{\bar{x}}, P_{\bar{y}}$ 和 $P_{\bar{z}}$ 。

$$\begin{cases} P_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{P_{x1}^2 + P_{x2}^2 + P_{x3}^2 + P_{x4}^2 + P_{x5}^2 + P_{x6}^2}{6}} \\ P_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{P_{y1}^2 + P_{y2}^2 + P_{y3}^2 + P_{y4}^2 + P_{y5}^2 + P_{y6}^2}{6}} \\ P_{\bar{z}} = \sqrt{\frac{P_{z1}^2 + P_{z2}^2 + P_{z3}^2 + P_{z4}^2 + P_{z5}^2 + P_{z6}^2}{6}} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 改进的 D-H 算法设计

当用 D-H 逆向运动算法表示穿刺机器人各个关节的参数时,各关节的相关参数如表 1 所列,穿刺机器人的物理坐标系及其参数如图 2 所示。

表 1 穿刺机器人 D-H 逆向运动算法参数

关节 i	关节角 θ_i	连杆长度 a_{i-1}/mm	偏移量 d_i/mm	扭转角 α_{i-1}
1	θ_1	0	0	0
2	θ_2	$a_1=750$	0	0
3	0	$a_2=250$	$d_3(0 \sim 200)$	0

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 + a_1 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} n_x \cos \theta_1 + n_y \sin \theta_1 & o_x \cos \theta_1 + o_y \sin \theta_1 & a_x \cos \theta_1 + a_y \sin \theta_1 & p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1 \\ n_y \cos \theta_1 - n_x \sin \theta_1 & o_y \cos \theta_1 - o_x \sin \theta_1 & a_y \cos \theta_1 - a_x \sin \theta_1 & p_y \cos \theta_1 - p_x \sin \theta_1 \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)中对应元素相等,可得:

$$\begin{cases} p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1 = a_2 \cos \theta_2 + a_1 \\ -p_x \sin \theta_1 + p_y \cos \theta_1 = a_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (9)$$

进一步,由式(9)可求得:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{\pm \sqrt{1-A^2}}{A}\right) + \eta \\ \theta_2 = \arctan\left[-\frac{r \sin(\theta_1 - \eta)}{r \cos(\theta_1 - \eta) - a_1}\right] \end{cases} \quad (10)$$

即:

$$\begin{cases} A = \frac{a_1^2 - a_2^2 + p_x^2 + p_y^2}{2a_1 \cdot \sqrt{p_x^2 + p_y^2}} \\ \eta = \arctan \frac{p_y}{p_x} \\ r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \end{cases} \quad (11)$$

考虑到穿刺机器人工业化产品,本文试验时标定两个连杆 a_1 和 a_2 的长度分别固定为 750 mm 和 250 mm。关节角 θ_1, θ_2 及偏移量 d_3 为关节变量。本文所需求解的机器人逆向运动学参数主要是两个旋转轴的角度 θ_1, θ_2 和连杆垂直行进距离 d_3 。

(1) 计算 θ_1 和 θ_2

用 ${}^{i-1}\mathbf{K}_i$ 来描述第 i 个连杆相对于第 $i-1$ 连杆的位姿,对于该 3 个自由度的机器人,其末端穿刺针为连杆 3 的坐标系,则它与基坐标系的关系为:

$${}^0\mathbf{K}_3 = {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 \quad (2)$$

由图 7 (x, y, z 是全局参考坐标系, n, o, a 是运动坐标)空间物体表示法可知:

$${}^0\mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

如图 2 物理坐标系中:

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_1 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

以 \mathbf{T}_1^{-1} 左乘 ${}^0\mathbf{K}_3$, 得:

$$\mathbf{T}_1^{-1} {}^0\mathbf{K}_3 = {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 \quad (7)$$

即:

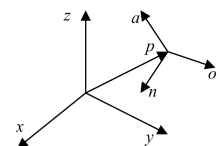


图 7 空间物体表示法

(2) 计算关节变量 d_3

由式(8)矩阵中的第 3 行第 4 个元素相等,即可得出:

$$d_3 = -p_z \quad (12)$$

(3) 算法过程

首先,医生通过 CT 图像,使用路径规划系统标定进针方向上与体表的交点 P_1 。然后,分别依据 6 个不同的标记点计算出 P_x, P_y, P_z 值 $(P_{x1}, P_{x2} \cdots P_{x6})(P_{y1}, P_{y2} \cdots P_{y6})(P_{z1}, P_{z2} \cdots P_{z6})$, 并按照式(1)计算平均值 $P_{\bar{x}}, P_{\bar{y}}$ 和 $P_{\bar{z}}$ 。其次,将

P_x, P_y 代入式(11)和式(10)计算得出 θ_1 和 θ_2 ; 将 P_z 代入式(12)计算得出 d_3 。最后,参照表 1 即可得到机器人运动的全部姿态参数,借此引导穿刺针到达标定定点 P_1 。

同理,穿刺针到达 P_1 点后,再次按照上述过程引导穿刺针到达病灶中心位置点 P_2 ,至此完成穿刺操作。算法过程如图 8 所示。

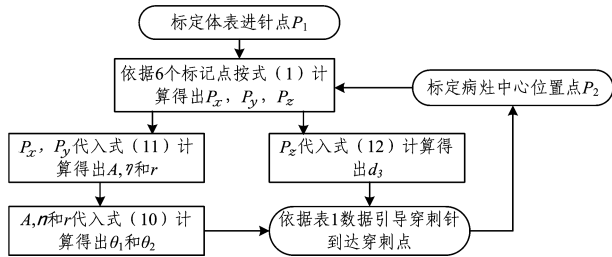


图 8 算法过程

3 实验仿真

以 CT 引导机器人辅助穿刺定位系统对肺部体模进行穿刺精度模拟实验。实验选用设备主要包括:日本东芝 Activion16 排 CT(扫描参数:螺旋扫描,层厚 1 mm,层间隔 1 mm);美国 SuperDimension 公司电磁定位仪和中科院苏州生物工程研究所穿刺手术机器人。

本实验挑选了 A, B, C 3 组操作人员进行模拟穿刺实验,每组进行 50 次模拟操作,每次穿刺完成后记录穿刺针尖到体模靶区中心点之间的距离值 D 。每组完成后计算 D 的平均值、标准差和最大值。模拟穿刺实验偏差统计结果如表 2 所列。3 组实验偏差的最大值为 1.95 mm,标注差为 0.26 mm 左右。

表 2 模拟穿刺实验偏差统计结果

(单位:mm)			
组别	平均值	标准差	最大值
A 组	1.61	0.22	1.95
B 组	1.48	0.26	1.98
C 组	1.45	0.27	1.76

实验结果表明,使用本文提出的定位机制进行实验,可以将穿刺精度控制在 2 mm 以内,标准差为 0.26 mm 左右,已能很好地满足临床需要。

在传统的穿刺治疗过程中,医生需反复行 CT 扫描验证和修正穿刺针位置来完成穿刺,耗时长,且易产生穿刺损伤和放射性辐射损伤;此外,操作的准确性受医生经验和技术水平等因素的影响较大。使用本文所提出的定位机制可保证较高的穿刺精度,大大提高了穿刺手术的一次成功率,缩短了手术时间,并在提高手术安全性的同时,减轻患者痛苦,有效减低辐射剂量。

分析制约进一步提高穿刺精度的原因可能有如下几点。

首先,标记点尺寸可能过大,标记点数目偏少。标记点的核心金属磁极直径为 2 mm,若将此直径缩小一半,理论上可能会进一步提升穿刺精度。标记点数目偏少。本实验共使用了 6 个标记点,如以多个标记点同时测量和校验,可有望进一步减小穿刺误差,本文的后续实验中,拟将标记点数目增加至 12 个。其次,患者呼吸运动影响。患者呼吸运动是造成误差的重要原因之一。最后,手术机器人本身运动和定位的精度也对实验整体结果影响较大。

结束语 本文提出了一种基于 CT 引导下机器人辅助经皮肺穿刺活检术的定位机制。首先,设计 6 个标记点,并同时固定于 CT 检查床,以在硬件上参考定位;其次,软件上以改进的 D-H 逆向运动算法实现 CT 图像引导机器人进行经皮肺穿刺操作。仿真实验结果表明,使用本文提出的定位机制可以较好地保证穿刺精度,特别有助于提高一次性穿刺成功率。同时,系统还具有较强的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] PERANDINI S, SOARDI G, MOTTON M, et al. Distribution of Solid Solitary Pulmonary Nodules within the Lungs on Computed Tomography: A Review of 208 Consecutive Lesions of Biopsy-Proven Nature. *Pol J Radiol*, 2016, 81: 146-151.
- [2] 康晓东. 医学影像图像处理[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2009.
- [3] TOPAL U, EDIZ B. Trasthoracic needle biopsy: factors effecting risk of pneumothorax[J]. *Eur J Radiol*, 2003, 48: 263-267.
- [4] 陈艳梅, 杨志永, 姜杉. 机器人辅助手术导航系统的注册技术[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27(5): 953-960.
- [5] WU X M, LIU Q. Optical localizer of surgical navigation system based on binocular stereo vision[J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2011, 15(35): 6584-6587.
- [6] ZHANG H, BANOVA F, LIN R, et al. Electromagnetic tracking for abdominal interventions in computer aided surgery[J]. *Computer Aided Surgery*, 2006, 11(3): 127-136.
- [7] 杨杰, 肖越勇, 张肖, 等. 电磁导航系统在 CT 引导下经皮穿刺肺活检术中的应用[J]. *中国介入影像与治疗学*, 2012, 9(3): 172-174.
- [8] 薛有华. 穿刺手术机器人控制系统研究与实现[D]. 天津: 南开大学, 2016.
- [9] 鞠浩, 张建勋, 安刚, 等. 机器人辅助脊柱微创手术系统设计与实现[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2008, 41(4): 31-35.
- [10] 宋银灏, 安刚, 张建勋, 等. 脊柱微创手术机器人运动控制系统的设计[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(14): 58-61.
- [11] SEITEL A, ENGEL M, SOMMER C M, et al. Computer-assisted trajectory planning for percutaneous needle insertions[J]. *Medical Physics*, 2011, 38(6): 3246.