

DOI: 10.7652/xjtuxb201904013

CT 导航下的机器人辅助穿刺定位方法

陈光彪¹, 付庄¹, 张铁锋², 沈运¹, 王尧¹, 施韦伊², 费健³

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 200240, 上海; 2. 上海市宝山区大场医院, 200436, 上海;
3. 上海交通大学医学院附属瑞金医院, 200025, 上海)

摘要: 针对机器人辅助穿刺中病灶定位系统价格昂贵、穿刺针全向定位机构结构复杂等问题, 分别提出了 CT 导航下病灶定位方法和穿刺针全向定位方法。基于坐标变换理论, 病灶定位方法由 3 个不共线标记点在 CT 和机器人坐标系的坐标数据辨识出 2 个坐标系之间的位置关系, 然后由 CT 下的病灶坐标实现病灶在机器人下的定位。全向定位方法结合病灶的定位结果和机器人运动学, 通过软件控制实现穿刺针在调整自身姿态时始终指向所定位病灶位置, 为病灶穿刺提供安全的进针点和入刺角度。搭建含 UR 机械臂的 6-DOF 辅助穿刺系统, 并在 CT 导航下对患者模型进行病灶和穿刺针的定位实验, 实验结果表明: 病灶定位误差在 3 mm 以内, 与基于 5 个标记点的最小二乘病灶定位法精度相当, 但定位效率提高约 40%, 其中病灶定位方法计算误差为 1.43 mm, 证明利用软件代替复杂机构的穿刺针全向定位方法是可行的。本文建立的病灶及穿刺针定位方法有效、准确, 可为后续病灶自主定位和穿刺针路径规划提供理论基础。

关键词: 机器人辅助穿刺; CT 导航; 病灶定位; 全向定位

中图分类号: TP249; R319 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)04-0085-08

Robot-Assisted Puncture Positioning Methods under CT Navigation

CHEN Guangbiao¹, FU Zhuang¹, ZHANG Tiefeng², SHEN Yun¹,
WANG Yao¹, SHI Weiyi², FEI Jian³

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Dachang Hospital, Baoshan District, Shanghai 200436, China;
3. Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China)

Abstract: Positioning methods of lesion and puncture needle under CT navigation are proposed, respectively, to solve the problem of expensive lesion positioning system and complex puncture needle omnidirectional positioning mechanism in robot-assisted puncture. Bases on the coordinate transformation, the lesion positioning method recognizes the position relationship between the CT system and the robot system by the coordinates of three non-collinear markers in both the systems, and then localization of the lesion in the robot system is realized from its coordinates in CT. The omnidirectional localization method combines the lesion positioning results and robot kinematics, and the needle always points to the positioned lesion regardless of its posture adjustment. It is realized by robot software control to get safe insertion points and angles for lesion puncture. A 6-DOF puncture system containing a UR robot is built to conduct lesion and

needle positioning experiments on a patient model under CT navigation. Results show that the lesion positioning error of the proposed method is less than 3 mm, and that the positioning accuracy is equivalent to that of the least squares location method based on five markers, while the location efficiency improves by about 40%, and the calculation error of the lesion positioning method is about 1.43 mm. It is feasible to realize the needle omnidirectional positioning through using software to replace the complex mechanism. Therefore, the proposed positioning methods are effective and accurate, and they may provide theoretical basis for further lesion autonomous positioning and needle path planning.

Keywords: robot-assisted puncture; CT navigation; lesion positioning; omnidirectional positioning

经皮穿刺作为一种微创介入手术,具有创伤小、靶向性强等优点^[1-3],被广泛应用于人体组织活检及药物定向治疗等场合^[4]。近年来,为了提高经皮穿刺手术的精度并且改善医生繁重且充满 X 射线辐射的徒手穿刺操作,机器人辅助穿刺技术逐渐得到了更多的研究和实际临床应用^[5-12]。机器人辅助穿刺包括病灶区域定位、穿刺针定位、穿刺针路径规划和穿刺进给等步骤,其中,病灶区域和穿刺针的定位是穿刺中的关键技术,是保证穿刺精度的基础。

目前流行的病灶定位方式是通过商用的高精度无框架式立体定位系统,如电磁、光学等定位系统^[13-15],对机器人坐标系与 CT 坐标系的变换关系进行自动或半自动标定,从而实现病灶点在机器人坐标系下的定位。但是,商用定位系统一方面价格昂贵且对手术室有特殊要求,另一方面安装、操作复杂,操作者学习成本高,而穿刺针的术前定位则是基于远端运动中心(remote center of motion,RCM)机构实现^[6,16],可机械式地保证穿刺针针尖绕进针点转动,从而调整穿刺针姿态至指向病灶点,但 RCM 机构结构复杂并且标定费时费力。

为了解决上述问题,本文在不借助外界定位系统的情况下,利用坐标变换理论建立病灶区域定位方法,并搭建机器人辅助穿刺系统对该定位方法加以验证。本文病灶定位方法根据 3 个不共线标记点在 CT 坐标系及机器人坐标系下的坐标,求解出 2 个坐标系之间的坐标变换矩阵,然后将 CT 坐标系下病灶点映射至机器人坐标系下,从而快速精确地实现病灶点在机器人坐标系下的定位。在此基础上,结合机器人运动学,通过软件方法设计 RCM 结构可实现的穿刺针的全向定位,即让穿刺针保持指向病灶位置的姿态,通过穿刺针的全向定位,可快速地确定安全、合适的进针点和穿刺针角度。除特殊说明,本文所述机器人坐标系均指机器人基座坐

标系。

1 病灶区域定位

病灶区域的定位,即确定病灶区域中心 f 在辅助穿刺机器人坐标系 $O_R-X_RY_RZ_R$ 下的坐标 (x_f^R, y_f^R, z_f^R) 。一般地,通过病灶区域的 CT 图像数据,可以方便地提取出病灶区域在 CT 坐标系 $O_C-X_CY_CZ_C$ 下的坐标 (x_f^C, y_f^C, z_f^C) 。假设坐标系 $O_C-X_CY_CZ_C$ 到坐标系 $O_R-X_RY_RZ_R$ 的齐次变换矩阵为 T_C^R ,则可以由式(1)实现病灶中心 f 在机器人坐标系下的定位。

$$\begin{bmatrix} x_f^R \\ y_f^R \\ z_f^R \\ 1 \end{bmatrix} = T_C^R \begin{bmatrix} x_f^C \\ y_f^C \\ z_f^C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_C^R & \mathbf{p}_{O_C}^R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f^C \\ y_f^C \\ z_f^C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}_C^R$ 为 3×3 维的旋转变换矩阵; $\mathbf{p}_{O_C}^R$ 为 3×1 维的平移变换矩阵。

病灶区域定位的核心是齐次变换矩阵 T_C^R 的求解,即旋转变换矩阵 $\mathbf{R}_C^R$ 和平移变换矩阵 $\mathbf{p}_{O_C}^R$ 的求解。因为至少 3 个点才能确定一个坐标系,故 T_C^R 的求解是由 2 个坐标系的至少 3 个公共点(本文称为标定点在 2 个坐标系下的坐标数据进行求解。一方面,可取至少有 4 点不共面的多个标记点,通常利用最小二乘法建立线性方程组求解 T_C^R ^[17],但是多个标记点意味着坐标数据的获取操作需多次才能完成,而且最小二乘法涉及高阶矩阵求逆、迭代、奇异值分解等数值运算,计算量较大,从而定位效率较低;另一方面, T_C^R 的求解至少需要 3 个标记点,因此为了保证定位效率,本文建立一种基于 3 个不共线标记点的病灶定位方法,如图 1 所示。另外,在临床上,标记点不共线条件比不共面条件更易满足。

1.1 旋转变换矩阵的求解

根据不共线的 3 个标记点 $M_i (i=1,2,3)$ 分别

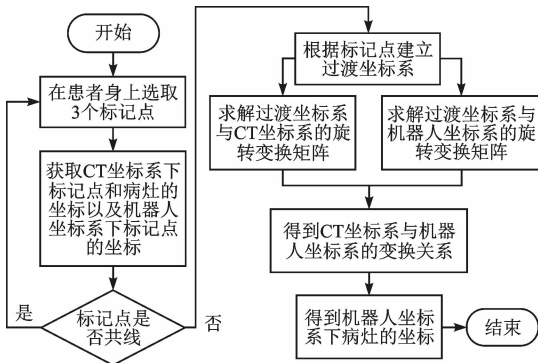


图1 病灶定位实现流程图

在机器人坐标系 $O_R-X_R Y_R Z_R$ 以及 CT 坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 下的坐标 $(x_{M_i}^R, y_{M_i}^R, z_{M_i}^R)$ 和 $(x_{M_i}^C, y_{M_i}^C, z_{M_i}^C)$, 求解出 2 个坐标系之间的旋转变换矩阵 R_C^R [18]。

当患者平躺在 CT 床上进行 CT 扫描时, 先在患者体表选取不共线的 3 点 M_1, M_2, M_3 并贴上磁片作为标记点。然后, 利用 M_1, M_2, M_3 这 3 个标记点建立过渡坐标系 $M_1-X_M Y_M Z_M$, 如图 2 所示: 以 M_1 为原点; 以点 M_1 指向点 M_2 的向量 $D_{M_1 M_2}$ 为 X_M 轴正方向, 其单位矢量为 e_1 ; 以向量 $D_{M_1 M_2}$ 与由点 M_1 指向点 M_3 的向量 $D_{M_1 M_3}$ 的向量积为 Z_M 轴正方向, 其单位矢量为 e_3 ; 以 e_3 与 e_1 的向量积为 Y_M 轴正方向, 其单位矢量为 e_2 。 $\{e_1, e_2, e_3\}$ 在 CT 坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 下的坐标表示分别为

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \frac{D_{M_1 M_2}}{|D_{M_1 M_2}|} \\ e_3 &= \frac{D_{M_1 M_2} \times D_{M_1 M_3}}{|D_{M_1 M_2} \times D_{M_1 M_3}|} \\ e_2 &= e_3 \times e_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $|\cdot|$ 表示向量的模;

$$D_{M_1 M_2} = (x_{M_2}^C - x_{M_1}^C, y_{M_2}^C - y_{M_1}^C, z_{M_2}^C - z_{M_1}^C)^T \quad (3)$$

$$D_{M_1 M_3} = (x_{M_3}^C - x_{M_1}^C, y_{M_3}^C - y_{M_1}^C, z_{M_3}^C - z_{M_1}^C)^T \quad (4)$$

将 $\{e_1, e_2, e_3\}$ 在 CT 坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 下的坐标表示简记为

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= (x_{e_1}^C, y_{e_1}^C, z_{e_1}^C)^T \\ e_2 &= (x_{e_2}^C, y_{e_2}^C, z_{e_2}^C)^T \\ e_3 &= (x_{e_3}^C, y_{e_3}^C, z_{e_3}^C)^T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

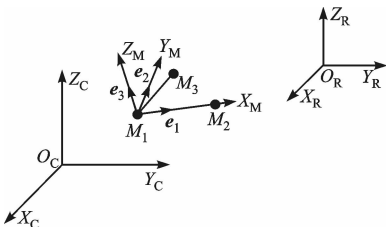


图2 标记点及过渡坐标系示意图

由于 $\{e_1, e_2, e_3\}$ 是过渡坐标系 $M_1-X_M Y_M Z_M$ 的 3 个坐标轴方向上的单位向量, 根据式 (5) 可以确定过渡坐标系 $M_1-X_M Y_M Z_M$ 到 CT 坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 的旋转变换矩阵表示为 [19]

$$R_M^C = \begin{bmatrix} x_{e_1}^C & x_{e_2}^C & x_{e_3}^C \\ y_{e_1}^C & y_{e_2}^C & y_{e_3}^C \\ z_{e_1}^C & z_{e_2}^C & z_{e_3}^C \end{bmatrix} \quad (6)$$

同理可得过渡坐标系 $M_1-X_M Y_M Z_M$ 到机器人坐标系 $O_R-X_R Y_R Z_R$ 的旋转变换矩阵为

$$R_M^R = \begin{bmatrix} x_{e_1}^R & x_{e_2}^R & x_{e_3}^R \\ y_{e_1}^R & y_{e_2}^R & y_{e_3}^R \\ z_{e_1}^R & z_{e_2}^R & z_{e_3}^R \end{bmatrix} \quad (7)$$

由 (6) 式和 (7) 式可以得到坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 到坐标系 $O_R-X_R Y_R Z_R$ 的旋转变换矩阵 R_C^R 为

$$R_C^R = R_M^R (R_M^C)^{-1} = R_M^R (R_M^C)^T = \begin{bmatrix} x_{e_1}^R & x_{e_2}^R & x_{e_3}^R \\ y_{e_1}^R & y_{e_2}^R & y_{e_3}^R \\ z_{e_1}^R & z_{e_2}^R & z_{e_3}^R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{e_1}^C & y_{e_1}^C & z_{e_1}^C \\ x_{e_2}^C & y_{e_2}^C & z_{e_2}^C \\ x_{e_3}^C & y_{e_3}^C & z_{e_3}^C \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.2 平移变换矩阵的求解

根据式 (8) 求解得到的旋转变换矩阵 R_C^R 以及标记点 $M_i (i=1, 2, 3)$ 的坐标 $(x_{M_i}^R, y_{M_i}^R, z_{M_i}^R)$ 和 $(x_{M_i}^C, y_{M_i}^C, z_{M_i}^C)$, 对式 (1) 进行变换得到平移变换矩阵

$$p_{O_C}^R = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [(x_{M_i}^R, y_{M_i}^R, z_{M_i}^R)^T - R_C^R (x_{M_i}^C, y_{M_i}^C, z_{M_i}^C)^T] \quad (9)$$

至此, 根据标记点在 CT 坐标系和机器人坐标系下的坐标, 求解出 CT 坐标系到机器人坐标系的齐次变换矩阵 T_C^R , 通过式 (1), 可实现病灶中心在机器人坐标系下的定位。

2 穿刺针全向定位

基于前文病灶中心 f 在机器人坐标系下的坐标, 开展对穿刺针的全向定位方法的研究。首先, 本文所述穿刺针的全向定位, 指的是在穿刺针针尖与病灶区域中心保持一定距离 r 的情况下, 尽管对穿刺针的穿刺角 θ 和方位角 β 有所调整, 但穿刺针始终保持指向病灶区域中心 f 的姿态, 即病灶中心 f 与穿刺针始终保持共线。

如图 3 所示的穿刺针全向定位模型中, $N_{\text{top}} N_{\text{tip}}$ 表示穿刺针, 其长度为 l , 其中 N_{tip} 为穿刺针的针尖, N_{top} 为穿刺针顶端。并且针尖 N_{tip} 与病灶中心 f 的

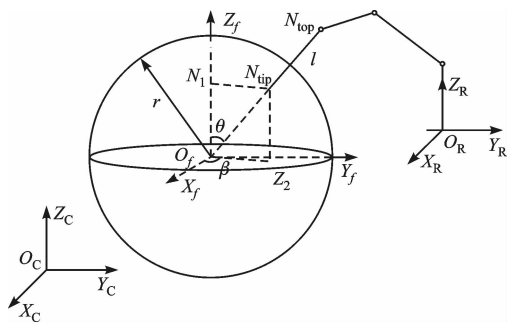


图 3 穿刺针全向定位模型

距离为 r , 即针尖 N_{tip} 始终位于以病灶中心 f 为球心, 半径为 r 的球面上。以病灶中心 f 为原点建立局部坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$, 其 3 个坐标轴的方向分别与 CT 坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 的坐标轴方向保持同向。 N_1, N_2 分别为针尖 N_{tip} 在 Z_f 轴和 $O_fX_fY_f$ 平面的投影点。由点 O_f 指向点 N_{tip} 的向量 $\mathbf{D}_{O_fN_{tip}}$ 与 Z_f 轴正向之间的夹角 θ 定义穿刺针的穿刺角, 由点 O_f 指向点 N_2 的向量 $\mathbf{D}_{O_fN_2}$ 与 X_f 轴正向之间的夹角 β 定义为穿刺针的方位角。

因此, 针尖 N_{tip} 、穿刺针顶端 N_{top} 在坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 下的坐标表示分别为

$$\left. \begin{aligned} x_{N_{tip}}^f &= r \sin \theta \cos \beta \\ y_{N_{tip}}^f &= r \sin \theta \sin \beta \\ z_{N_{tip}}^f &= r \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{N_{top}}^f &= (r+l) \sin \theta \cos \beta \\ y_{N_{top}}^f &= (r+l) \sin \theta \sin \beta \\ z_{N_{top}}^f &= (r+l) \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由于坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 的坐标轴与 CT 坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 的坐标轴同向, 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 到 $O_c-X_cY_cZ_c$ 的齐次变换矩阵 $\mathbf{T}_f^c$ 可表示为

$$\mathbf{T}_f^c = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{p}_{O_f}^c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为 3×3 维的单位矩阵; $\mathbf{p}_{O_f}^c = (x_f^c, y_f^c, z_f^c)^T$ 是病灶中心 f 在 $O_c-X_cY_cZ_c$ 坐标系下的坐标。

根据式(8)和式(9)得到的旋转矩阵 $\mathbf{R}_c^R$ 和平移矩阵 $\mathbf{p}_{O_c}^R$, 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 到机器人坐标系 $O_R-X_RY_RZ_R$ 的齐次变换矩阵 $\mathbf{T}_f^R$ 可表示为

$$\mathbf{T}_f^R = \mathbf{T}_c^R \mathbf{T}_f^c = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c^R & \mathbf{p}_{O_c}^R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{p}_{O_f}^c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c^R & \mathbf{R}_c^R \mathbf{p}_{O_f}^c + \mathbf{p}_{O_c}^R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

因此, 针尖 N_{tip} 、穿刺针顶端 N_{top} 在坐标系 $O_R-X_RY_RZ_R$ 下的坐标表示分别为

$$\begin{bmatrix} x_{N_{tip}}^R \\ y_{N_{tip}}^R \\ z_{N_{tip}}^R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c^R & \mathbf{R}_c^R \mathbf{p}_{O_f}^c + \mathbf{p}_{O_c}^R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \sin \theta \cos \beta \\ r \sin \theta \sin \beta \\ r \cos \theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

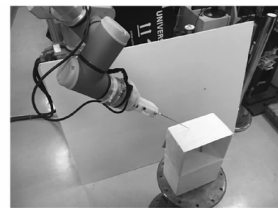
$$\begin{bmatrix} x_{N_{top}}^R \\ y_{N_{top}}^R \\ z_{N_{top}}^R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c^R & \mathbf{R}_c^R \mathbf{p}_{O_f}^c + \mathbf{p}_{O_c}^R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (r+l) \sin \theta \cos \beta \\ (r+l) \sin \theta \sin \beta \\ (r+l) \cos \theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

当穿刺针处于全向模式时, 由式(14)(15)可以求出此时针尖 N_{tip} 、穿刺针顶端 N_{top} 在坐标系 $O_R-X_RY_RZ_R$ 下的坐标, 从而可以确定此时穿刺针在机器人坐标系下的位置和姿态。最后, 根据辅助机器人的逆运动学的求解结果控制机器人使穿刺针到达对应位姿, 从而实现穿刺针的全向定位。全向定位的意义在于可方便地调整穿刺针的穿刺角和方位角以规避穿刺路径中的重要组织和器官, 为安全进针点、穿刺角度的确定以及穿刺针的路径规划提供便利。

3 实验验证

3.1 病灶定位方法验证

3.1.1 实验设备 实验设备主要包括 CT 机、UR3 机械臂、患者模型(含标记点和病灶)以及刚性穿刺针等。实验中使用的 CT 机由上海市宝山区大场医院提供, 型号为 SIEMENS SOMATOM Emotion, 是目前国际先进的 16 层螺旋 CT 机, 如图 4a 所示; 使用的辅助穿刺机器人为 UR3 机械臂, 具有 6 个自由度, 其末端同轴安装刚性穿刺针, 如图 4b 所示。



(a) SIEMENS CT 机 (b) UR3 辅助穿刺机械臂

图 4 实验设备图

如图 5 所示, 实验中用规则的硬纸箱代表患者, 在纸箱的上表面取 3 个点 A、B、E 以及侧面取 2 个点 C、D 作为标记点并贴上磁片。在活体实验时, 可以在活体皮肤等相对位置较为固定的地方贴上 3 个不共线的磁片作为标记点。在纸箱内部安装螺栓, 以螺栓末端中心点作为病灶位置, 如图 5a 所示。其

中,在纸箱内部安装有 3 个不同高度的螺栓,其末端中心点 H 、 M 和 L 分别代表 3 个不同的病灶位置。

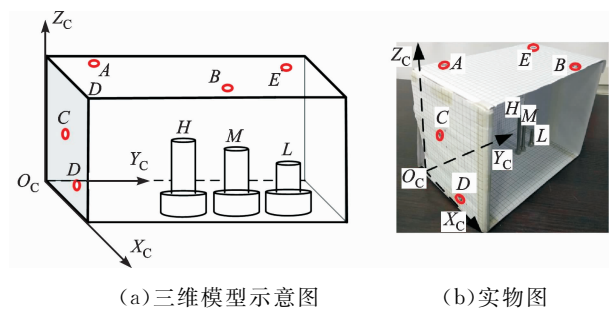


图 5 病灶区域及标记点分布图

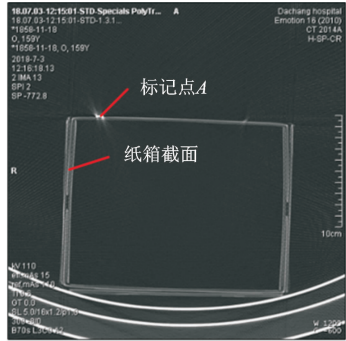
病灶定位方法验证实验主要包括标记点及病灶位置在 CT 以及机器人坐标系下坐标的获取 2 部分。因实验条件有限,本实验中 CT 机未和 UR3 机械臂组成穿刺系统,其中 CT 坐标系下坐标的获取在医院利用 CT 机完成,而机器人坐标系下坐标的获取利用实验室 UR 机器人完成,但是并不影响实验数据的有效性以及病灶定位方法在活体实验中 CT 系统与机器人系统构成在线穿刺系统下的适用性。

3.1.2 CT 坐标系下坐标的获取 由于本实验所使用的 CT 机没有系统坐标系,因此需外部建立 CT 坐标系。如图 5 所示,以纸箱内腔的一个顶点为 O_C 原点,其所在的 3 条棱为坐标轴建立 CT 坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$,其中坐标轴 $O_C X_C$ 的方向与 CT 床的运动方向平行。活体实验中,CT 坐标系可以是 CT 系统自带的坐标系或按此方法在外部物体上建立。

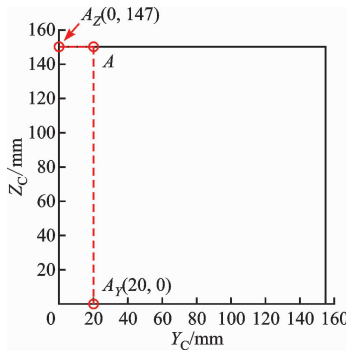
利用 CT 机对纸箱进行 CT 扫描,得到一系列如图 6 所示的沿坐标轴 $O_C X_C$ 方向的等距离 CT 扫描图,且前后 2 张 CT 图的间距为 5 mm,并将首次出现平面 $O_C Y_C Z_C$ 的 CT 图的序号设定为 1。

标记点 A 在 CT 坐标系下坐标的获取方法如下:①序号 1 的 CT 图的 x 轴坐标为 0,标记点 A 出现在如图 6 所示的 CT 图中,该 CT 图序号为 3,因此 A 的 x 轴坐标为 10 mm;②通过 CT 图像分析软件提供的比例尺、测距功能来提取 A 的 Y 轴、 Z 轴坐标,分辨率为 1 mm。如图 6 所示,沿纸箱内边做出平面 $O_C Y_C Z_C$ 以及 A 点在 Y_C 轴和 Z_C 轴上的垂足 A_Z 和 A_Y ,测距得到线段 AA_Z 和 AA_Y 的长度分别为 20 mm 和 147 mm,故 A 点的 Y 轴、 Z 轴坐标分别为 20 mm 和 147 mm。

依照标记点 A 的方法,可分别得到其他标记点 B 、 C 、 D 、 E 以及 3 个病灶位置 L 、 M 、 H 在 CT 坐标系下的坐标,如表 1 所示。



(a) A 点所在的 CT 图



(b)CT 下 A 点坐标获取操作图

图 6 CT 坐标系下 A 标记点坐标获取方法

表 1 标记点及病灶位置在 CT 坐标系下的坐标

坐标	标记点					病灶位置		
	A	B	C	D	E	L	M	H
x/mm	10	110	60	90	20	50	50	50
y/mm	20	120	-10	-10	150	150	130	120
z/mm	147	147	80	20	147	39	63	76

注: x 轴坐标分辨率为 5 mm; y 、 z 轴坐标分辨率均为 1 mm。

3.1.3 机器人坐标系下坐标的获取及定位结果 标记点及病灶点在 UR3 机械臂坐标系下的坐标利用“针尖触碰法”采集,具体包含以下步骤:

(1)测量穿刺针针尖到机械臂末端法兰端面的距离 $l=401$ mm,将针尖设置为机械臂的工件中心点(TCP),其位置相对默认 TCP 的偏置值为(0,0,401) mm,姿态保持默认值,机械臂默认的 TCP 点为端面法兰中心;

(2)控制机械臂运动使得针尖依次触碰各标记点及病灶位置,并从机器人控制界面读取此时针尖在机器人坐标系下的坐标即为对应标记点或病灶位置在机器人坐标系下的坐标。

因此,将纸箱放置在机器人坐标系下,利用上述“针尖触碰法”可分别得到标记点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 以及 3 个病灶位置 L 、 M 、 H 在机器人坐标系下的坐标。

通过 3 个标记点和不同病灶位置点的不同组合方式,进行了多组对比实验。第 1 组实验是选取 A、B、C 这 3 个标记点,分别对 3 个病灶位置 L 、 M 、 H 进行定位,所记录的坐标数据如表 2 所示,病灶位置

的定位结果如表 3 所示。第 2 组实验固定病灶位置为 M ,依次选取 A - B - C 、 A - B - E 以及 A - C - D 这 3 组标记点进行定位实验,所记录的坐标数据如表 4 所示,病灶 M 的定位结果如表 5 所示。

表 2 标记点及病灶位置在机器人坐标系下的真实坐标

坐标	标记点			病灶位置		
	A	B	C	L	M	H
x/mm	417.67	557.74	423.48	543.02	527.05	519.10
y/mm	-291.23	-272.83	-231.41	-336.48	-324.48	-318.38
z/mm	534.59	534.57	604.06	641.60	617.63	604.58

表 3 A - B - C 标记点组合下病灶位置 L 、 M 、 H 的定位结果

病灶位置	机器人坐标系下的预测坐标			各方向绝对定位误差			总定位误差/mm
	x/mm	y/mm	z/mm	$ \Delta x /\text{mm}$	$ \Delta y /\text{mm}$	$ \Delta z /\text{mm}$	
L	544.83	-338.12	643.33	1.81	1.64	1.73	2.99
M	528.96	-325.92	619.34	1.91	1.44	1.71	2.94
H	521.03	-319.82	606.35	1.93	1.44	1.77	2.99

注:各方向绝对定位误差为各方向坐标预测值与真实值之差的绝对值,总定位误差为各方向绝对定位误差平方和的算术平方根。

表 4 3 组标记点组合中各标记点及病灶 M 在机器人坐标系下的真实坐标

坐标	标记点组合 1(A - B - C)			标记点组合 2(A - B - E)			标记点组合 3(A - C - D)			病灶 M
	A	B	C	A	B	E	A	C	D	
x/mm	465.15	602.02	492.55	465.15	602.02	540.74	465.15	492.55	518.62	554.23
y/mm	-298.26	-332.68	-244.10	-298.26	-332.68	-404.60	-298.26	-244.10	-227.75	-370.12
z/mm	533.71	533.97	602.28	533.71	533.97	533.96	533.71	602.28	661.64	617.50

表 5 3 组标记点组合下病灶 M 的定位结果

标记点组合	病灶 M 机器人坐标系下坐标预测值			病灶 M 各方向绝对定位误差			病灶 M 总定位误差/mm
	x/mm	y/mm	z/mm	$ \Delta x /\text{mm}$	$ \Delta y /\text{mm}$	$ \Delta z /\text{mm}$	
组合 1(A - B - C)	555.87	-370.49	619.19	1.64	0.37	1.69	2.38
组合 2(A - B - E)	555.81	-371.97	617.94	1.58	1.85	0.44	2.47
组合 3(A - C - D)	560.82	-367.30	617.43	6.59	2.82	0.07	7.17

此外,以表 4 中 A 、 B 、 C 、 D 、 E 标记点, M 病灶位置为例,对本文基于 3 个标记点病灶定位方法和基于 4 个、5 个标记点的最小二乘法的定位精度进行比较,其中 A - B - C 组合采用本文病灶定位方法, A - B - C - E 及 A - B - C - D - E 组合采用最小二乘定位法,结果如表 6 所示。

由表 6 可知,随着标记点的增加,基于最小二乘定位方法定位误差逐渐降低。本文病灶定位方法与基于 5 个标记点的最小二乘定位方法定位精度相近,但定位效率约提升 40%。

表 6 本文定位方法和最小二乘定位方法的定位误差

标记点组合	病灶定位方法	病灶 M 定位误差/mm
A - B - C	本文	2.38
A - B - C - E	最小二乘法	3.55
A - B - C - D - E	最小二乘法	2.48

3.2 误差分析

由表 3、表 5 的数据可以看出:本文建立的病灶定位方法误差在 3 mm 以内,其中表 5 中标记点组合 3(A - C - D)定位误差较大,这是因为标记点 A 、 C 、

D 的位置接近一条直线,矩阵存在病态。因此,选取标记点时应避免标记点分布在一条直线上及其附近区域,这一点在临床上是容易满足的;或者通过增加标记点数量,通过其中 3 个标记点的不同组合来减小因某 3 个标记点共线造成的过大的定位误差。

实验的误差来源主要包括定位方法的计算误差、机器人运动控制误差以及穿刺针变形、末端针尖抖动等外部因素造成的误差 3 个部分。

3.2.1 病灶定位方法计算误差 由所求齐次变换矩阵 $\mathbf{T}_C^R$,可得标记点 $M_i(i=1,2,3)$ 在机器人坐标系下坐标的预测值。根据 3 个标记点坐标预测值与其真实值之间绝对误差的均值来衡量定位方法的计算误差如下

$$e_{in} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 | \mathbf{T}_C^R(x_{M_i}^C, y_{M_i}^C, z_{M_i}^C, 1)^T - (x_{M_i}^R, y_{M_i}^R, z_{M_i}^R, 1)^T |$$

(16)

式中: e_{in} 表示定位方法的计算误差; $\mathbf{T}_C^R$ 表示所求解的 CT 坐标系到机器人坐标系的齐次变换矩阵; $(x_{M_i}^C, y_{M_i}^C, z_{M_i}^C, 1)$ 为标记点 M_i 在 CT 坐标系下的齐次坐标; $(x_{M_i}^R, y_{M_i}^R, z_{M_i}^R, 1)$ 为标记点 M_i 在机器人坐标系下的齐次坐标。

以表 2 记录的第 1 组实验中标记点的坐标数据为例,计算得到定位方法的计算误差如表 7 所示。由表 7 及式(16)可知:基于 3 个不共线标记点的病灶定位方法的计算误差为各点计算误差的均值,约为 1.43 mm。因此,在保证一定精度的情况下,该病灶定位方法可以快速实现病灶区域的定位。

3.2.2 机器人运动控制误差 本实验所用 UR3 机械臂的运动控制采用位置型阻抗控制方法:由机械臂末端的刚度系数矩阵、阻尼系数矩阵、位置偏差、速度偏差及雅可比矩阵得到各关节力矩控制量并求解关节动力学方程得到关节实际角度和速度,利用正运动学和雅可比矩阵将其转换为末端实际位置和速度并负反馈至末端期望位置和速度得到位置偏差和速度偏差。其中,动力学方程中惯量、阻尼等参数利用最小二乘法辨识。

因此,运动控制误差主要包括动力学参数辨识误差以及基于偏差的负反馈控制方法的误差。综合而言,本实验所用 UR3 机械臂的控制误差为 0.1 mm。

3.2.3 穿刺针变形、抖动等外部因素 在针尖触碰获取标记点及病灶位置在机器人坐标系下的坐标的过程中,针尖抖动及穿刺针变形都会使坐标数据存在误差。此外在临床穿刺手术中,由患者呼吸等引起的病灶、标记点的抖动也会造成标记点和病灶相对位置的不稳定性。这些外部因素都会给病灶定位带来误差。为了有效减小由外部因素造成的误差,进行病灶定位时,可以在患者皮肤表面加装紧固装置以及使用刚度更高的穿刺针。

3.3 穿刺针全向定位的实现

根据表 3,当标记点组合为 A-B-C 时,病灶位置 M 在机器人坐标系下的预测坐标为 (528.96, -325.92, 619.34) mm。以病灶 M 为例,介绍穿刺针全向定位在 UR 机械臂下的一种实现,具体步骤如下。

(1)设定全向定位模式下进针点即针尖 N_{tip} 与病灶位置 M 的安全距离 $r=150$ mm;与穿刺针共线且远离机器人处的一虚拟点 M' , M' 点与针尖的距离为 r 。将虚拟点 M' 设置为机械臂的 TCP 点,依据安全距离 r 与针尖到机械臂末端法兰端面的距离 $l=401$ mm,将其位置相对默认 TCP 的偏置值定为 (0,0,551) mm,姿态保持默认值。

(2)控制机械臂运动使得机械臂 TCP 点在机器人坐标系下的坐标为 M 的预测值,即与预测的病灶位置重合。

(3)控制 UR 机械臂保持 TCP 点的位置不变,通过改变 TCP 点的姿态来调节穿刺针的穿刺角 θ 及方位角 β ,从而实现穿刺针的全向定位。

活体实验时,安全的穿刺角 θ 及方位角 β 需结合 CT 影像中组织器官的分布及 CT 坐标系综合确定。假设安全穿刺角 $\theta=10^\circ$,安全方位角 $\beta=45^\circ$,由式(14)(15)可得此时安全进针点即针尖 N_{tip} 在机器人坐标系下的坐标为 (554.75, -322.40, 471.62) mm,

表 7 本文病灶定位方法的计算误差(以第 1 组实验为例)

标记点	机器人坐标系下坐标预测值			各方向上绝对计算误差			各点计算 误差/mm
	x/mm	y/mm	z/mm	$ \Delta x /mm$	$ \Delta y /mm$	$ \Delta z /mm$	
A	417.33	-290.59	535.40	0.34	0.64	0.81	1.09
B	557.55	-272.17	535.38	0.19	0.66	0.81	1.06
C	424.00	-232.71	602.44	0.52	1.3	1.62	2.14

穿刺针顶端 N_{top} 在机器人坐标系下的坐标为 (623.69, -313.01, 76.70) mm, 从而可确定安全的进针点和进针方向。

4 结 论

(1) 基于 3 个不共线标记点建立了病灶定位方法, 在此基础上结合机器人运动学, 利用软件方法提出了一种穿刺针的全向定位技术; 利用 UR 机械臂搭建了辅助穿刺系统, 并进行了病灶定位的验证实验, 同时利用 UR 机械臂实现了穿刺针的全向定位。

(2) 在不借助外部定位系统的情况下, 病灶定位误差在 3 mm 以内, 与基于 5 点的最小二乘定位法精度相当, 但定位效率提高约 40%, 其中定位方法自身的计算误差约为 1.43 mm, 验证了该方法的有效性和准确性, 可为穿刺手术提供良好的精度基础。

(3) 在临床病灶定位中, 采用紧固装置或使用刚度更高的穿刺针等改进措施, 可减小患者呼吸、针尖抖动以及穿刺针变形等因素对标记点及病灶点坐标数据稳定性的影响, 从而保证病灶定位精度。

参考文献:

- [1] GANDAGLIA G, GHANI K R, SOOD A, et al. Effect of minimally invasive surgery on the risk for surgical site infections: results from the National Surgical Quality Improvement Program (NSQIP) database. [J]. JAMA Surgery, 2016, 149(10): 1039-1044.
- [2] HANSEN-ALGENSTAEDT N, KWAN M K, ALGENSTAEDT P, et al. Comparison between minimally invasive surgery and conventional open surgery for patients with spinal metastasis: a prospective propensity score-matched study [J]. Spine, 2017, 42(10): 789-797.
- [3] DIEBERG G, SMART N A, KING N. Minimally invasive cardiac surgery: a systematic review and meta-analysis [J]. International Journal of Cardiology, 2016, 223: 554-560.
- [4] 黄惠, 曾丹, 程美清, 等. 超声引导经皮肺周围型肿瘤穿刺活检的临床应用 [J]. 影像诊断与介入放射学, 2016, 25(1): 65-68.
HUANG Hui, ZENG Dan, CHENG Meiqing, et al. Efficacy of ultrasound-guided biopsy of peripheral lung lesions [J]. Diagnostic Imaging & Interventional Radiology, 2016, 25(1): 65-68.
- [5] ANZIDEI M, ARGIRO R, PORFIRI A, et al. Preliminary clinical experience with a dedicated interventional robotic system for CT-guided biopsies of lung le-

- sions: a comparison with the conventional manual technique [J]. European Radiology, 2015, 25(5): 1310-1316.
- [6] 赵新刚, 杨唐文, 韩建达, 等. 机器人辅助针穿刺技术 [J]. 科学通报, 2013, 58(s2): 20-27.
ZHAO Xingang, YANG Tangwen, HAN Jianda, et al. A review on the robot-assisted needle puncture technology [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(s2): 20-27.
- [7] 丑武胜, 王田苗. 面向脑外科微创手术的医疗机器人系统 [J]. 机器人技术与应用, 2003(4): 18-21.
CHOU Wusheng, WANG Tianmiao. Medical robot system for minimally invasive surgery in department of cerebral surgery [J]. Robot Technique and Application, 2003(4): 18-21.
- [8] ISHII H, KAMEGAWA T, KITAMURA H, et al. Development of a prototype of puncturing robot for CT-guided intervention [C]// Proceedings of the 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1020-1025.
- [9] HUNGR N, BRICAULT I, CINQUIN P, et al. Design and validation of a CT- and MRI-guided robot for percutaneous needle procedures [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(4): 973-987.
- [10] 王畅. 导航技术、机器人技术在超声引导肝肿瘤经皮热消融中的应用研究 [D]. 北京: 解放军总医院, 2008: 24-27.
- [11] 冯涛, 杨向东, 熊璟, 等. 穿刺机器人本体标定实验研究 [J]. 机械设计与制造, 2010(2): 155-157.
FENG Tao, YANG Xiangdong, XIONG Jing, et al. Experimental study on calibration for medical robot [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(2): 155-157.
- [12] 孙银山, 吴冬梅, 杜志江, 等. 用于机器人辅助穿刺手术进针策略研究的猪肝进针力建模 [J]. 高技术通讯, 2011, 21(9): 948-953.
SUN Yinshan, WU Dongmei, DU Zhijiang, et al. Modeling of needle insertion force in porcine livers for studying needle insertion strategies of robot-assisted percutaneous surgery [J]. Chinese High Technology Letters, 2011, 21(9): 948-953.
- [13] KETTENBACH J, KARA L, TOPOREK G, et al. A robotic needle-positioning and guidance system for CT-guided puncture: Ex vivo results [J]. Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, 2014, 23(5): 271-278.

(下转第 99 页)