

文章编号: 1004-7220(2023)02-0375-07

静脉穿刺机械臂穿刺与挑针动作

丁皓^{1a}, 庄逸², 阚孟菲², 夏冬阳², 丁思吉², 盛诗梦², 徐欣茹², 尚昆^{1b}, 杨戈尔^{1a}, 吕杰^{1b}

(1. 上海健康医学院 a 医疗器械学院, b 康复学院, 上海 201318; 2. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要:目的 提出一种新型多关节串联静脉穿刺系统,探究其穿刺过程中进针、挑针动作涉及的以力学、运动学为基础的相关控制问题,验证此系统的可行性。**方法** 搭建穿刺机械臂实物,结合穿刺力学模型提出进针位移控制算法。利用DH法进行正运动学解算,得到末端针尖坐标,再利用几何法进行逆运动学解算,正逆过程联系紧密。采用运动学正解-逆解-再正解方法比较挑针前后的末端坐标位置误差,最后结合实物进行实验验证与仿真。**结果** 经过仿真及实验,验证理论模型的准确性。利用该进针算法可以实现一针见血,为机械臂动作的控制提供理论依据。挑针前后末端位置误差可以控制在1 mm以内。机械臂在挑针过程中末端针尖几乎保持固定,故此套挑针方案可行,基本可以验证机械臂挑针动作满足精度与安全要求。**结论** 该静脉穿刺机械臂真实模拟穿刺过程的进针、挑针动作,能够安全、准确地实现进针穿刺和以针尖为定点的挑针动作,具有一定的临床使用价值。

关键词: 静脉穿刺; 穿刺力学; 机器人控制; 正逆运动学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.02.025

Puncture and Needle Picking Action of Venipuncture Manipulator

DING Hao^{1a}, ZHUANG Yi², KAN Mengfei², XIA Dongyang², DING Siji², SHENG Shimeng², XU Xinru², SHANG Kun^{1a}, Yang Geer^{1a}, LÜ Jie^{1b}

(1a. School of Medical Instruments, 1b. College of Rehabilitation Sciences, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China; 2. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Objective To propose a new multi-joint series venipuncture system, explore the mechanics and kinematics-based related control problems involved in needle insertion and needle picking during the puncture process, and verify feasibility of this system. **Methods** A puncture manipulator was built, and needle displacement control algorithm was proposed by combing with the puncture mechanics model. The the forward kinematics was calculated by using DH method, so as to obtain the tip coordinates. Then the inverse kinematics was calculated by using the geometric method. The forward and inverse processes were closely connected. The position error of the end coordinates before and after needle picking was compared by using the method of kinematics positive solution-inverse solution-re-positive solution. Finally, experimental verification and simulation were conducted by combining with the physical object. **Results** Through simulation and experiments, accuracy of the theoretical model was verified. The needle insertion algorithm could be used to achieve success with only one needle insertion, which provided theoretical basis for the control of robot arm. The position error before and after needle picking could be controlled within 1 mm from the end trajectory. The end needle tip of robot arm was almost kept fixed during the needle picking process. Therefore, this needle picking scheme was feasible and could basically verify that the needle picking action of robot arm met the accuracy and safety requirements. **Conclusions** The venipuncture manipulator truly simulates the needle insertion and needle picking action during the puncture process, and can safely and accurately realize the needle insertion and needle picking action with needle tip as the fixed point, indicating that it has certain clinical values.

Key words: venipuncture; puncture mechanics; robot control; positive and inverse kinematics

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-02-21

通信作者: 吕杰, 副教授, 硕士生导师, E-mail: lvj@sumhs.edu.cn

近年来,机器人技术迅猛发展,机器人凭借其实用性高、便利程度高、高效率、多用途、专业化等特点,在众多领域都发挥重要的作用^[1-3]。在临床上,穿刺成功率极大依赖护理人员的经验和熟练程度,如果患者肤色较深、表皮覆盖有伤痕或者脂肪层较厚,想要识别血管会有难度;在一些特殊场景下,如野外救援、战场救治等缺少现场专业医护人员时,重大疫情期间繁重的防护措施会影响医护人员操作,或医护人员不便直接接触患者时,人为直接操作并保证一定穿刺成功率成为难题。本文设计一款静脉穿刺系统,包含提供入针点定位的机器视觉定位模块、提供穿刺、挑针功能的机械臂、提供人机交互的上位机控制界面等部分,旨在实现特殊场景下代替或辅助人工进行静脉穿刺,同时保证患者的安全和穿刺成功率^[4]。与人工进行静脉穿刺相比,该系统具有一定优势,能适应各种多变环境的需求,完成复杂性更高的任务,可自主完成穿刺动作,也可实现医护人员远程操作^[6]。该系统能有效提高静脉穿刺精度及效率,减少医护人员的工作量,并有助于实现远程医疗及医疗自动化,拥有广阔的应用前景。

1 系统总体设计

机械臂是静脉穿刺机器人系统中的一个关键组成部分,本文主要针对静脉穿刺系统中机械臂的穿刺和挑针两块动作实现展开研究与实验。目前针对静脉穿刺机器人的研究大都停留在实验室和临床试验阶段,且采用超声等影像学手段跟踪控制针头位置,成本高,设备庞大,计算复杂^[5-6]。为此,本文提出采用能够使结构更轻巧、控制更简单的力学控制。整个穿刺流程为:操作机械臂到达预定位置,末端执行器进针一段距离刺破静脉壁后暂停进针,整个进针过程利用S型拉压力传感器的实时数据反馈控制进针位移量,该传感器量程0~5 kg,输出精度0.05% F. S,其原理主要利用金属的应变效应,具有耐热性好、热滞后性好,长期使用稳定性好的特点。为了更加真实模拟日常的穿刺操作,本文创新性地提出利用串联式机械臂现有结构实现多轴联动的挑针动作,免去另外设计复杂冗余的结构,即针刺入静脉之后以针尖为圆心,末端关节轴旋转挑起一定角度,通过计算挑针前后机械臂各

个关节的角度,多轴联动调整位姿从而实现挑针动作。在此过程中,针尖的空间位置需要保持不变,挑针完毕继续进针,从而完成整个静脉穿刺动作。为了避免挑针动作对人体的伤害,此过程对机械臂各关节的控制精度要求极高。为了完成挑针动作,需要先通过正运动学解算出末端针头的空间位置,再根据针头的空间坐标及末端关节挑起的角度逆解出其他各个关节需要的旋转角度。挑针完毕,末端执行器再继续进针一小段距离,进针到位。

如图1所示,机械臂模块由1个四轴机械臂和末端执行器构成,可以完成进针、退针、挑针的操作。下位机采用STC8系列单片机作为机械臂主体位姿调节控制中心,以AVR单片机为核心的Arduino板作为末端穿刺执行装置的主控。4个旋转关节分别由3个步进电机和1个舵机驱动,包含底部旋转关节1、步进电机2、旋转关节3/4/6、舵机5;末端执行装置7由夹针装置8、S型拉压力传感器9、滑块10、丝杆电机11和外壳构成。其中,拉压力传感器和夹针装置固定在同一轴线上,可实时采集针头受力情况。

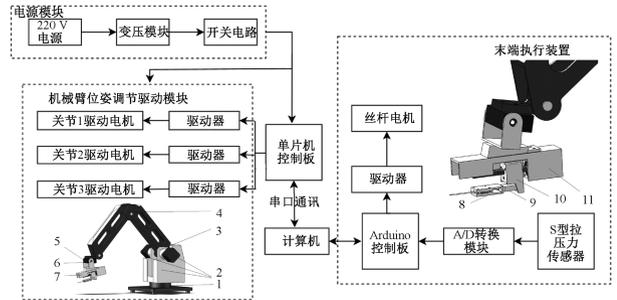


图1 机械臂总体设计

Fig. 1 Overall design of the venipuncture robot

整个进退针操作的控制过程中穿插着挑针动作的控制,硬件控制的流程如下:首先,由操作者在电脑端发出指令,开始进针,Arduino板会判断实时针头受力值的变化并控制进针位移量(位移=丝杆导程×步进电机转动圈数)。进针到位后,Arduino板会发送确认信号给控制关节电机的STC8单片机,STC8单片机记录当前各关节电机旋转角度,并根据需求计算出挑针后各关节电机需要转动的角度(角度可由脉冲数计算而来)。接收到信号后,即控制关节电机旋转执行挑针动作。挑针动作完毕后,

Arduino 板同样也会收到来自单片机的信号,控制丝杆电机旋转,继续进针一段距离后停止,从而完成整套穿刺动作。此过程中的针头受力数据会实时显示在上位机界面,可通过计算机端上位机控制界面对该过程进行干预和监控。

2 穿刺进针功能

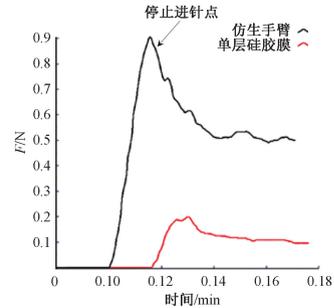
2.1 穿刺进针力学模型

穿刺进针过程中,针头依次穿过皮肤、皮下组织、静脉壁,最终到达目标位置。在穿过这些组织时,针的受力实时变化。本课题组先前已通过大量实验得到穿刺过程中针头受力规律。这些实验利用仿生材料硅胶膜片以及覆有硅胶膜的仿真手臂进行,因为硅胶膜有着和人体皮肤、血管组织相类似的力学特性^[7-8]。图 2(a)所示为单层硅胶膜实验得到的力学曲线。可以看到,随着时间的增加,针头受力越来越大,直到刺破。在刺破瞬间,力值会有突降。在控制针进给运动时就可以利用这一特点,在刺破瞬间停止进针,从而避免针穿刺过度引发危险。

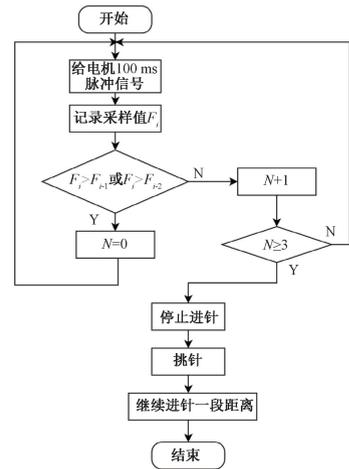
2.2 进退针控制系统设计

本文利用采集力值突降控制针的运动行程,进针过程中控制器需要根据连续采集到的 n 个值判断针头是否已经刺破血管。由于血管壁厚度一般在 1.2 mm 以内,将进针速度控制在 3 mm/s 左右为最佳。且经过测试发现,在穿刺过程中采集数据的噪声较小。为了使比较数据时产生的延时对位置判断造成的影响达到最小,综合评估后决定取 $n=3$,即通过连续采集的 3 个力值判断针是否到位。

图 2(b)所示为穿刺进针控制的流程。首先,将实时穿刺力值 F_i 与程序流程中记录的前两个值 F_{i-1} 和 F_{i-2} 进行比较。如果 F_i 比前两个值都小,且连续 3 次都按此步骤,那么就可以停止进针。如果 F_i 比之前连续记录的两个值中的任意一个大,则接着回到第 1 步循环给电机脉冲信号使其继续运转,每进行 1 次数据间的判断近似需要花费 100 ms。假设针此时已经刺破血管,经过连续 3 次数据比较所花费的时间在 300 ms 左右。当进针速度为 3 mm/s,由于延时带来的多余行程可以控制在 1 mm 以内。该过程基本理论穿刺距离在 1 mm 之内,而静脉直径一般在 3~5 mm,此段行程不会使针轻易穿透下层血管壁,符合实际安全要求。



(a) 穿刺过程中针头受力随时间变化曲线



(b) 穿刺进针控制算法流程

图 2 穿刺力学模型及控制算法

Fig. 2 Puncture mechanics model and control algorithm

(a) Needle force-time curve during puncture, (b) Flow chart of control algorithm for puncture needle

在基于 Qt 制作的上位机界面上,有受力数值显示区、末端执行装置控制区和受力曲线显示区。其中,受力数值显示区可以实时显示传感器采集的通过串口传输给上位机的受力数值,末端执行装置控制区的控制按钮可以让操作者在紧急状态下人为干预进退针过程,受力曲线显示区实时展示针头的受力曲线,便于医护人员观测与监控。

3 机械臂挑针功能

本文基于 $D-H$ 坐标系进行相关运动学分析^[9]。这种方法是在机器人的每个连杆上都固定 1 个坐标系,然后用 4×4 的齐次变换矩阵来描述相邻两连杆的空间关系^[10]。通过依次变换可最终推导出末端执行装置相对于基坐标系的位姿。对本研究涉及的机械臂建立 DH 坐标系,并设定相关 $D-H$ 参数(见表 1)。

表 1 机器人连杆的 *D-H* 参数

Tab. 1 *D-H* parameters of the robot connecting rod

<i>i</i>	θ_i	d_i/mm	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$
1	θ_1	L_1	0	90
2	θ_2	0	L_2	0
3	θ_3	0	L_3	0
4	θ_4	0	L_4	0

注:*i* 为连杆序号, θ_i 为关节角, d_i 为连杆偏距, a_{i-1} 为轴间距, α_{i-1} 为轴转角。

3.1 机械臂正运动学分析

根据 *D-H* 法则建立坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的变换^[11], 这个变换是由 4 个参数(关节角 θ 、连杆偏距 d 、轴间距 a 、轴转角 α) 构成的函数, 通过对每个连杆逐一建立坐标系, 把该运动学问题分解成 n 个子变换, 即 ${}^{i-1}T$, 该矩阵用来描述连杆坐标系 $\{i\}$ 相对于 $\{i-1\}$ 的齐次变换^[12-14]。其中

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & a_{i-1} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & a_{i-1} \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将表 1 数据代入式 (1), 求得末端针头相对于基坐标系的齐次变换矩阵 0T :

$${}^0T = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 = \begin{bmatrix} c_{1234} & -s_{1234} & 0 & a_2 c_{12} + a_3 c_{123} + a_4 c_{1234} \\ s_1 c_{234} & -s_1 s_{234} & -c_1 & a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} + a_4 s_1 c_{234} \\ s_{234} & c_{234} & 0 & d_1 + a_2 s_2 + a_3 s_{23} + a_4 s_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在本研究中, 机械臂连杆的相关 *DH* 参数为, $d_1 = L_1 = 148 \text{ mm}$, $a_1 = L_2 = 200 \text{ mm}$, $a_2 = L_3 = 200 \text{ mm}$, 由于在挑针之前还有进针运动, 故 L_4 的长度并非固定不变, 需要根据丝杆步进电机的脉冲数计算得到针尖沿直线方向的前进距离, 最终可计算

$$L_4 = \sqrt{b^2 + h^2} = \sqrt{\left(b_0 + \frac{k}{200}\gamma\right)^2 + h^2} \quad (3)$$

式中: b 、 h 的含义见图 3(a); b_0 为 b 的初始值; k 为电机脉冲数; γ 为丝杆导程, 对于此款步进电机, 转一圈需要 200 个脉冲。各关节转角 θ_i 根据步进电机脉冲数计算求得, 所选步进电机步距角为 1.8° , 即整步运行时 1 次脉冲旋转角度为 1.8° 。利用单片机计算各步进电机的脉冲数, 获得各个关节转过

的角度, 从而得到末端针尖的位置坐标。

3.2 机械臂逆运动学求解

按照静脉穿刺的流程, 接下来需要执行的是挑针动作, 考虑到穿刺的安全性和患者的舒适性, 挑针动作需要除关节 1 之外的 3 个关节联动, 而针尖的位置固定不动, 相当于以针尖、关节 2 为固定支座的四连杆机构, 实线为挑针前机械臂的位姿, 虚线为挑针后的位姿, 关节 4 的旋转角度为根据实际穿刺情况预设且恒定值, 设定为顺时针旋转 10° , 需要求解关节 2、3 的旋转角度 θ_2 和 θ_3 。

考虑到单片机算法的简洁性和计算结果的精确度, 在逆运动学求解过程中, 选择几何法^[13]。该问题为 xOz 平面的变换, 建立如图 3(b) 所示的 xOz 坐标系。因为挑针角度已知, 且根据前文正运动学计算结果, 可知 $\angle\gamma$ 的角度值:

$$\gamma = \arctan \frac{h}{b} + \varphi'$$

其中, φ' 为针与水平面夹角。另外, OA 、 AB 、 PB 的长度分别为 L_2 、 L_3 、 L_4 , P 点坐标 (P_x, P_z) 。

首先, 求出 B 点坐标 $B(B_x, B_y)$, 其中:

$$\begin{aligned} B_x &= P_x - P_x B_x = P_x - PB \cdot \cos \gamma \\ B_y &= P_z + P_z B_z = P_z + PB \cdot \sin \gamma \end{aligned} \quad (4)$$

在 $\triangle ABO$ 中, 利用余弦定理求得 θ_3 及 α :

$$\begin{aligned} \theta_3 &= 180^{\circ} - \alpha = \\ 180^{\circ} - \arccos &\frac{L_2^2 + L_3^2 - OB^2}{2L_2L_3} \end{aligned} \quad (5)$$

根据恒等关系列出方程:

$$OB_x = OA_x + A_x B_x = L_2 \sin(\alpha - \beta) + L_3 \sin \beta \quad (6)$$

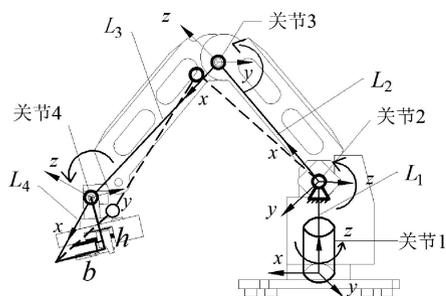
而易知

$$\theta_2 = 90^{\circ} - (\alpha - \beta)$$

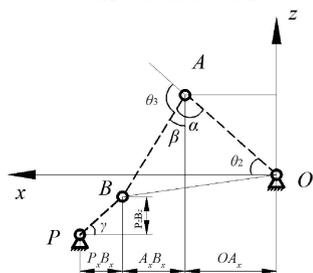
至此, 已将所需的各关节的旋转角度求出。接下来便可通过调节步进电机脉冲控制各关节旋转相应角度, 从而完成挑针动作。

3.3 机器人挑针运动仿真

利用 MATLAB 软件中的机器人工具箱 (Robotics Toolbox) 中自带的 `fkine` 函数, 对机械臂正运动学解算并仿真验证^[15]。先操作机械臂到达预定进针位置, 由上位机界面读出此时各关节的转角 θ_i 和电机脉冲数 k (假设此时 $k = 1\ 200$), 在机器人工具箱中设定目标姿态的关节向量为:



(a) 挑针前后关节及连杆



(b) 各关节角度

图3 挑针动作运动学解算

Fig.3 Kinematics solution of needle picking action (a) Front and rear joints and connecting rods of needle picking, (b) Each joint angle

$$q_1 = [0, (52.8/180)\pi, (-85.6/180)\pi, (-13.6/180)\pi]$$

求出此时的变换矩阵为:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0.6896 & 0.7242 & 0 & 370.68 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -0.7242 & 0.6896 & 0 & 113.22 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可知,末端针尖的坐标为 $P(370.68, 0, 113.22)$ 。接着进行逆运动学解算。假设挑针前针与水平面夹角 $\varphi = 15^\circ$,挑针角度为 10° ,需要按照上文中所述几何方法先算出挑针后的各关节转角,求得关节向量为:

$$q_2 = [0, 53.384/180 \times \pi, -92.081/180 \times \pi, 2.26/180 \times \pi]$$

根据 q_2 再次调用 fkine 函数,求解出挑针后的变换矩阵:

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0.8045 & 0.5939 & 0 & 370.64 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -0.5939 & 0.8045 & 0 & 113.17 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据 T_2 可以得到挑针后的末端针尖的坐标为

$P'(370.64, 0, 113.17)$ 。可以看到,和挑针前的末端针尖坐标 $P(370.68, 0, 113.22)$ 相比,误差在 0.05 mm 以内。之后,又随机生成 5 组末端针尖坐标,分别经过正逆运动学解算得出挑针后的坐标(见表 2)。结果表明,最大误差均未超过 0.05 mm ,为挑针动作的实际控制提供理论基础。

表2 仿真得到 5 组随机姿态下挑针前后的末端针尖位置坐标

Tab.2 Position coordinates of the end needle tip before and after the needle is picked in 5 sets of random postures obtained by simulation

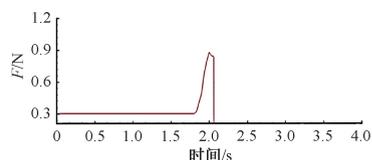
序号	挑针前		挑针后		Δ_{\max}/mm
	x/mm	z/mm	x'/mm	z'/mm	
1	372.80	230.32	372.79	230.31	0.01
2	357.16	244.58	357.16	244.62	0.04
3	408.40	155.91	408.40	155.92	0.01
4	444.76	126.23	444.77	126.24	0.02
5	452.01	140.93	451.99	140.94	0.02

注: Δ_{\max} 为最大误差。

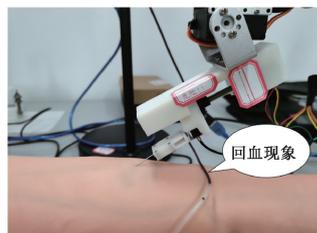
4 实验

4.1 手臂模型穿刺实验

在手臂模型上进行穿刺实验,此手臂模型具有可替换调整的模拟皮肤、模拟血管、模拟血流等特征,将机械臂定位到目标点上方,确认位置之后执行穿刺命令,以 30° 入针角度、 3 mm/s 速度进针,上位机实时显示穿刺受力曲线[见图 4(a)]。进针穿刺后,若穿刺成功,可以看到针头进入血管后透明管内有明显回血[见图 4(b)]。



(a) 上位机界面穿刺力曲线显示



(b) 回血现象

图4 穿刺进针实验结果

Fig.4 Results of needle puncture test (a) Puncture force curve display on the host computer interface, (b) Bleeding back phenomenon

经过 25 组对不同皮肤厚度(0.5、0.8、1.2、1.5、2.0 mm)及血管直径(3、4、5、6、7 mm)条件的排列组合穿刺实验,穿刺成功率在 100%。该结果表明,此套穿刺方案可行,验证了穿刺算法的准确性,满足精度与安全要求。

4.2 挑针前后末端定位精度实验

为了验证在实际环境下静脉穿刺机械臂挑针动作的可行性,利用百分表测量随机姿态下挑针前

后的末端针尖位置误差,先操作机械臂到达随机不同的初始位置,将表固定在表架上,将测量头轻轻抵住针头,使指针转过 1 圈,此时转动表盘让指针指向 0 刻度线,即每次测量以挑针前的位置为基准进行测量。挑针完毕后再读出的数据就是挑针后相对挑针前针尖的位置误差,用此方法分别测量 X 和 Z 方向的位置误差,得到的误差值绘制成散点图(见图 5)。

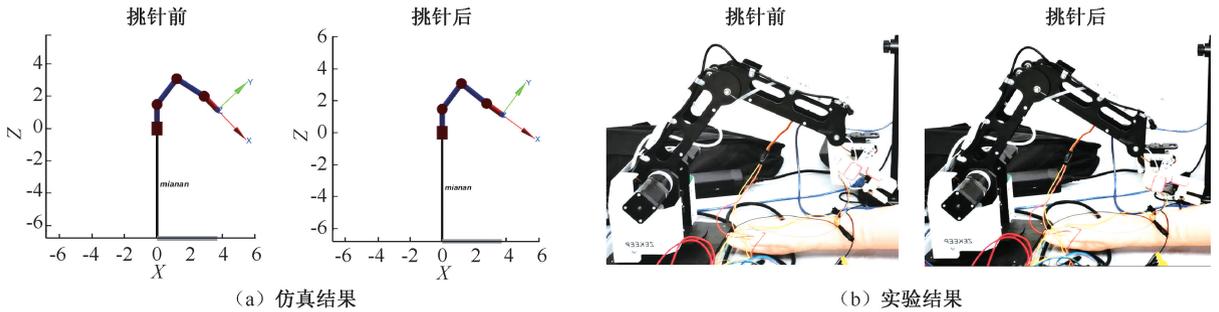


图 5 挑针前后位姿对比

Fig. 5 Posture comparison before and after needle picking (a) Simulation results, (b) Experimental results

结果表明,在挑针前后机械臂末端针尖的空间位置变化误差比仿真结果大,但最大不超过 1 mm(见图 6)。结合实际情况血管直径在 4~6 mm,对实际功能影响不大,此情况主要由机械臂装配误差及机械臂尺寸的测量误差导致。

严谨。

(2) 从仿真结果和实验的误差来看,挑针动作已基本满足静脉穿刺机器人的功能需要。挑针过程中,末端针尖轨迹还是存在 1 mm 以内的偏移,装配误差以及测量造成的系统误差。前期已通过得到的多次测试结果对相关参数进行修改,在控制程序中做出合理补偿,尽量抵消此误差。后续研究需要进一步对轨迹规划算法进行优化,提高速度、加速度的规划精度,尽可能保证末端点的静止。

(3) 机械臂关节轴减速器齿轮间隙以及步进电机可能出现的丢步造成的随机误差。针对此问题的解决方法主要有在步进电机控制时对步距角进一步细分,或选用精度更高的电机,未来可以加入反馈控制和柔顺控制等。

(4) 由于现阶段条件受限,主要采用硅胶材料进行实验,其无法完全模拟人体血管及皮肤的特性,故还需要探索更为接近人体组织的材料。后期还将补充动物试验,因为动物模型更接近人体穿刺力学模型,更能验证该研究的实用性。

下一阶段将继续结合相关穿刺实验对静脉穿刺机器人进行进一步验证及改进,并完善相关功能。

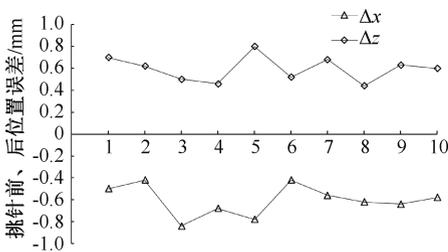


图 6 机械臂挑针前、后定位误差

Fig. 6 Positioning error of mechanical arm before and after needle picking

5 讨论

本文搭建并验证了穿刺机械臂的穿刺及挑针模块。实验和仿真结果显示,目前的控制模型及算法基本可行,但还是存在如下的局限性:

(1) 进一步优化基于穿刺力学模型的进针控制,加入检测传感器(如图像传感器、超声图像等)对进针过程实时监测,让进针动作的控制反馈更加

6 结论

本文通过样机搭建、实验调试,以仿真手臂模型作为穿刺对象,主要针对进针、挑针动作测试了穿刺机械臂的性能。结合穿刺力学模型提出进针控制算法,通过穿刺实验验证该算法的准确性。可以明显看到针管内的回血,说明针头进针到位。为了实现以针尖为定点的挑针动作,对所提出的运动学模型进行验证实验及仿真,对比挑针前后的末端点坐标。结果表明,坐标 x 、 y 方向误差均在 1 mm 以内,能够保证挑针精度,实现挑针功能,为后续系统完善与改进提供理论基础。

参考文献:

- [1] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展 [J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963-972.
- [2] ATIQUE M, SARKER M, AHAD M. Development of an 8DOF quadruped robot and implementation of inverse kinematics using Denavit-Hartenberg convention [J]. *Heliyon*, 2018, 4(12): 1-19.
- [3] 陆晨迪,苗新刚,汪苏. 一种护理机器人运动学分析与试验 [J]. 机械设计, 2020, 37(11): 94-101.
- [4] CHEN A, NIKITCZUK K, NIKITCZUK J, *et al.* Portable robot for autonomous venipuncture using 3D near infrared image guidance [J]. *Technology*, 2013, 1(1): 72-87.
- [5] 霍亮生,黎进远,王燕青,等. 自动静脉穿刺装置及控制系统研究 [J]. 中国医疗器械杂志, 2017, 41(3): 200-203.
- [6] 李苗. PICC 置管手术过程中静脉穿刺装置设计及控制系统研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2018(9): 43-45.
- [7] LI Z, LI M, WEI J, *et al.* A robotic system for investigation on mis-alignment force of needle and vein needle insertion into blood vessel [C]//Proceedings of the 2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). Wuhan:[s,n.], 2017.
- [8] 丁皓,刘雨佳,张迎,等. 壁冠状动脉周向应力体外加载装置的研制 [J]. 医用生物力学, 2020, 35(3): 311-318. DING H, LIU YJ, ZHANG Y, *et al.* Development of an *in vitro* loading device for circumferential stress of mural coronary arteries [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(3): 311-318.
- [9] 黄晓辰,张明路,张小俊,等. 机器人坐标系建立的改进 DH 方法 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 313-318.
- [10] 赵智勇,王冬青. Dobot 机器人运动学分析及建模仿真 [J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2017, 32(1): 52-57.
- [11] 李良敏,何超,宋成利,等. 微创手术机器人机械臂结构设计及工作空间分析 [J]. 医用生物力学, 2019, 34(1): 40-46. LI LM, HE C, SONG CL, *et al.* Structure design and workspace analysis of robotic arm for minimally invasive surgical robot [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(1): 40-46.
- [12] 魏丽君,吴海波,刘海龙,等. 基于 D-H 算法的移动机械臂正运动学研究 [J]. 计量与测试技术, 2020, 47(10): 1-5.
- [13] YAHYA S, MOGHAVVEMI M, MOHAMED H. Geometrical approach of planar hyper-redundant manipulators: Inverse kinematics, path planning and workspace [J]. *Simul Model Prac Th*, 2011, 19(1): 406-422.
- [14] CRAIG JJ. Introduction to robotics: Mechanics and control [M]. Englewood: Prentice Hall, 1986.
- [15] 陆佳皓,平雪良,李朝阳. 基于 MATLAB Robotic Toolbox 的关节型机器人运动仿真研究 [J]. 机床与液压, 2017, 45(17): 60-62.