

基于超声图像的 PICC 智能穿刺医疗 机器人控制系统设计

薛 明^{1,2}

(1. 常州市第二人民医院, 江苏 常州 213000; 2. 常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213000)

摘要: 为提高静脉穿刺置管手术的穿刺成功率, 缓解病人所承担的生理性伤痛, 设计基于超声图像的 PICC 智能穿刺医疗机器人控制系统; 以晶振复位电路作为穿刺置管的输出动力支持, 通过驱动控制电机的传输调度作用, 实现对智能传感器的精准化控制, 降低置管过程中针头的平均进入深度, 完成 PICC 智能穿刺医疗机器人及其控制应用结构搭建; 在此基础上, 按照静脉置管图像的实际特征分析结果, 转换原有的超声图像格式, 经过多次边缘性检测, 实现对穿刺超声图像的初级预处理; 获取静脉靶向血管的位置信息, 在规划穿刺路径的同时, 完成对机器人操作手的重定位控制, 实现医疗机器人的运动控制模型分析; 仿真对比实验结果显示, 与常规静脉穿刺手段相比, 穿刺控制系统可将进针角数值控制在 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间、进针深度保持在整个针头的 $2/3$ 以内, 可大幅提升穿刺置管的成功几率, 实现减轻病人所承担生理性疼痛的目的。

关键词: 超声图像; 医疗机器人; 控制系统; 复位电路; 边缘检测; 靶向血管; 穿刺路径; 操作手

Control System Design of PICC Intelligent Puncture Medical Robot Based on Ultrasonic Image

Xue Ming^{1,2}

(1. Changzhou No. 2 People's Hospital, Changzhou 213000, China;

2. College of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213000, China)

Abstract: In order to improve the success rate of venipuncture catheterization and relieve patients' physiological pain, a PICC intelligent puncture medical robot control system based on ultrasonic images was designed. The crystal oscillator reset circuit is used as the output power support of the puncture catheterization. The transmission scheduling function of the drive control motor is used to realize precise control of the intelligent sensor, reduce the average penetration depth of the needle during the catheterization process, and complete the construction of the PICC intelligent puncture medical robot and its control application structure. On this basis, the original ultrasonic image format was converted according to the analysis results of the actual characteristics of the venous catheterization image, and the preliminary preprocessing of the puncture ultrasonic image was realized after several marginal tests. To obtain the position information of the vein targeted vessels, and at the same time to plan the puncture path, to complete the repositioning control of the robot operator and realize the motion control model analysis of the medical robot. The results of the simulation and comparison experiments show that compared with the conventional venipuncture, the puncture control system can control the value of the insertion Angle between 10° and 40° , and keep the insertion depth within $2/3$ of the whole needle, which can greatly improve the success rate of puncture and catheterization, and achieve the goal of alleviating the physiological pain of patients.

Keywords: ultrasonic image; medical robots; control system; reset circuit; edge detection; target blood vessels; puncture route; gunner

0 引言

机器人控制技术是为使机器人完成各种执行动作, 而制定出的多项精准控制手段, 作为计算机系统中的重要实施技术, 包含人工智能、伺服控制、运动控制等多类进程性任务, 既包括基础的硬件执行环境, 也包括多种行为化应用软件^[1-2]。早期的程式化机器人采用顺序控制方式, 随着计算机技术的发展, 整个硬件设备环境可完全实现对机电装置的精准配合, 且能够在原有控制程序的基础上, 插

入适量的一体化控制节点, 一方面实现了机器人控制技术的多元化应用, 另一方面也从根本上解决了多传感器环境下信息融合稳定性相对较差的问题。在 C++、Java、VB 等多项汇编语言的支持下, 机器人的实际应用范围也在不断扩大, 如近年来发展极为迅速的医疗机器人操作控制系统^[3]。

静脉穿刺置管是现阶段 PICC (peripherally inserted central cathete, 外周静脉置入的中心静脉导管) 智能医疗机器人所能执行的最高等级穿刺手术, 在实施穿刺处理的过程中, 需要多个电机及传感设备的共同配合, 才能实现对底端操作手的精准化定位与控制。常规静脉穿刺手段需对患者进行局部麻醉, 将管体置于指定位置后, 可通过观测既

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-07-09。

作者简介: 薛 明(1980-), 男, 江苏常州人, 大学本科, 工程师, 主要从事云计算、区域医疗及移动医疗方向的研究。

定体表标志,来判断本次操作是否能够达到理想处置需求。但此方法的进针深度必须超过整个针头 3/4,易加剧患者所承担的生理性伤痛,降低穿刺置管手术的实际成功率。为解决此问题,在超声图像的支持下,设计一种新型的 PICC 智能穿刺医疗机器人控制系统,联合晶振复位电路与驱动控制电机,完成操作手与控制主机间穿刺数据的无损传输,根据穿刺后图像的边缘检测结果,判断本次置管手术是否成功。

1 PICC 智能穿刺医疗机器人及其控制应用结构

PICC 智能穿刺医疗机器人控制系统硬件执行环境由晶振复位电路、驱动控制电机、智能传感器三部分组成,具体搭建方法如下。

1.1 晶振复位电路

晶振复位电路如图 1 所示。晶振复位电路可为 PICC 智能穿刺医疗机器人提供操作手控制所需的应用电子,在 VCC 输入终端的作用下,经过 INT、RXD 等多个电子接口的聚合作用,实现与 GND 输出终端间的对应连接。在此过程中,为保证静脉穿刺置管手术超声图像的顺利传输,R0 电阻始终保持相对稳定的连接阻值,一方面收集处于分散状态的传输电子,另一方面可在未知电流传输量数值的情况下,更改输入端、输出端间的电子传输均值水平^[4]。C1、C2 作为两个负载能力相同的电感元件,可借助滑动调阻器 R 与复位输出端 GND 相连,当 AT89C51 晶振控制主机接收到来自机器人操作手终端的电子应用需求后,XTAL1、XTAL2 接口开启顺序连接状态,1—4 号 VPP 接口自发建立与 0 号 RXD 接口的共联关系,此时 PICC 智能医疗机器人执行穿刺进针指令^[5]。随着 EA 接口中电子传输总量的增加,PROG 接口与电阻 R0 间的传输关系也变得更加紧密,在确保穿刺针已进入患者静脉环境中后,ALE1、ALE2 接口自行屏蔽初始连接状态,以此达到控制机器人穿刺进针深度的目的,此情况下的真实进针深度基本能够保持在整个针头长度的 2/3 之内。

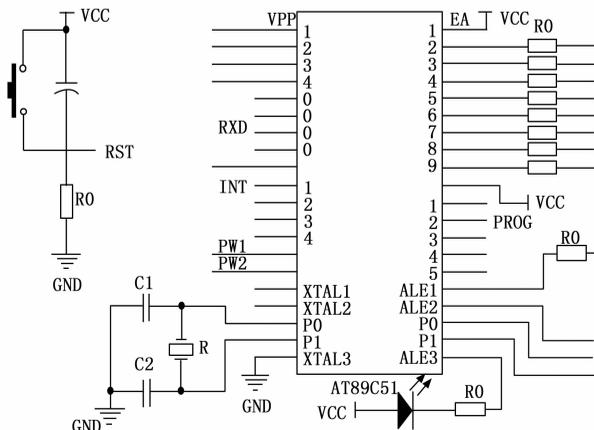


图 1 晶振复位电路图

1.2 驱动控制电机

驱动控制电机结构如图 2 所示。驱动控制电机与系统

晶振复位电路直接相连,可调节机器人操作手的实际穿刺处置行为,通常情况下,主电路输出的传输电子量越多,医疗机器人的穿刺进针越深;主电路输出的传输电子量越少,医疗机器人的穿刺进针越浅。主电机直立于控制底座上部,借助两端的旋调接触板与座体相连,为实现对 PICC 智能穿刺医疗机器人的精准控制,可旋动接触板螺丝的实际松紧程度,螺丝接触得越紧,驱动电机对于机器人的控制效果越严格,反之则越松弛^[6-7]。穿刺控制旋钮主管机器人操作手在实际穿刺过程中的进针角度,规定钮结构顺时针旋动为控制正方向,代表穿刺进针角度的逐渐增大;钮结构逆时针旋动为控制反方向,代表穿刺进针角度的逐渐缩小。新型控制系统的旋调范围相对受限,实际穿刺操作的进针角度也始终处于 30~40° 之间,故钮结构向两端旋调的最大幅度也必须保持在 2~3 圈之内。连接臂包裹于主控制轴外部,可随机器人操作手运动行为的改变,变动两端轴体与臂体之间的实际距离。在操作转轴的作用下,下部主控制轴与连接臂时刻处于不定性运动状态,这也是机器人操作手具备较强穿刺灵活性的主要原因。

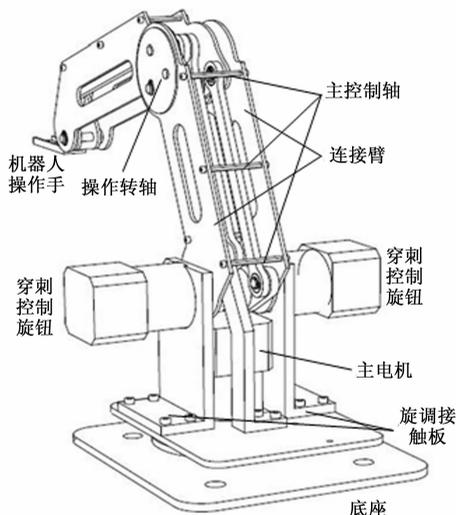


图 2 驱动控制电机结构图

1.3 智能传感器

智能传感器实现了 PICC 智能穿刺医疗机器人控制信号到实用信号的转换,与晶振复位电路、驱动控制电机均保持紧密的电子传输连接关系。整个传感结构体由行进电机、图像存储器、万向轮等多个应用元件共同组成,在整个穿刺进针控制过程中,所有元件体之间互相协调配合,可为机器人操作手提供相对稳定的执行处置环境^[8]。由前视图来看,万向轮位于智能传感元件前端,与辅助行进轮同属于机器人运动控制装置,当驱动控制电机开启快速输出模式后,图像存储器内与静脉穿刺置管手术相关的画面信息大量累计,行进电机驱动遮挡板持续向下运动,直至板件能够弯曲遮挡原始存储器结构,在此过程中,与静脉穿刺置管手术相关的画面信息始终保持相对稳定的存储状态。智能传感器前视图如图 3 所示。

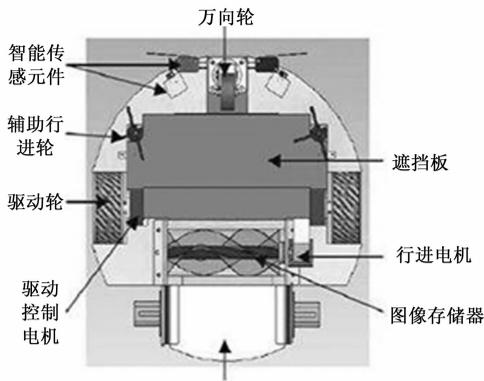


图 3 智能传感器前视图

由图 3 来看, 智能传感元件平均分布于底盘边缘地带, 在驱动轮的作用下, PICC 智能穿刺医疗机器人可实现自主行进运动。晶振复位电路作为可驱动智能传感元件的应用设备, 与系统主电机始终保持连接互通关系。辅助行进轮可在穿刺手术实施的过程中, 保持小幅转向运动, 一方面可促进机器人操作手的持续性稳定, 另一方面可避免进针角及进针深度的无故增大。

2 超声图像预处理

在相关机器人控制应用结构的支持下, 按照图像格式转换、图像特征分析、画面边缘检测的操作流程, 完成基于 PICC 智能穿刺医疗服务的超声图像预处理。

2.1 图像格式转换

符合 PICC 智能穿刺医疗机器人控制需求的静脉穿刺置管手术图像格式包含 BMP、AVI、RAW 三种类型。其中, BMP 图像是一类与存储格式无关的待识别位图信息, 以 BITMAPFILEHEADER 节点作为控制文件的头插入位置, 在实施穿刺行为控制的过程中, 系统调色板始终保持 24 位真彩色格式, 转换后图像的阵列信息也均由图像本身的色差数据构成^[9]。AVI 图像的生成类似于一种以辅助软件为支持的数字化视频压缩技术, 结合静脉穿刺置管手术来看, PICC 智能穿刺医疗机器人只负责承载与最终控制指令相关的数据流信息, 主要以图像数据为主。转换前图像基本保持随机分布的排列方式, 而转换后图像则可按照机器人操作手所处的实时位置进行排列, 从而增强图像与图像之间的连贯性, 最终生成完整的穿刺手术超声图像画面^[10]。RAW 图像指的是与节点控制程序完全匹配的数据文件, 灰度化水平相对较高, 每一个像素节点只能表示一个与之对应的控制指令, 随机器人所执行穿刺手术时间的延长, 转换后 RAW 图像的灰度水平快速下降, 能够基本满足超声图像的实际处理需求。

2.2 图像特征分析

超声图像特征可分为灰度特征、纹理特征两类。其中, 灰度图像特征主要用来描述超声图像中的节点信息, 灰阶级数越高, 所显示出静脉穿刺置管手术画面的声像层次感也就越强, 与影像相关的信息总量数值也就越大。在 PICC

智能穿刺医疗机器人控制系统中, 图像信号的传递或转换会造成图像质量出现不可逆的下降基本表现为灰度覆盖范围的缩小或非线性现象的产生, 即在穿刺置管手术中, 所获取图像某些细节部分由于灰度表现形式过于接近而无法被人眼直接识别。在静脉穿刺置管手术画面的超声图像中, 纹理是用来诊断图像应用性的重要特征条件^[11]。一幅完整的超声图像纹理是成像控制系统能分辨出的最小单位条件, 且一个单位内往往包含大量不可分辨的微小散射体结构。超声波在人体血管中传输时, 每遇到一个细微的不可辨结构, 就会发生一次超声散射行为, 波体与波体之间也存在着明显的作用干扰, 这也是导致机器人穿刺回波出现波动, 从而形成超声图像纹理特征的主要原因。

2.3 画面边缘检测

图像边缘是静脉穿刺置管手术画面的最本质特征, 广泛存在于图像中的血管与背景肌肉组织之间、血管与血管之间。常见检测状态可分为如下两种: 阶越性图像中各类边缘像素的灰度值明显不同; 屋顶状图像中边缘像素主要位于灰度值由增加到减小的转折位置处^[12]。画面边缘检测也叫画面边缘增强, 是使静脉穿刺置管手术图像轮廓更加突出的像素处理方法, 具备较强的区域化灰度处理能力。边缘检测能够突出已获取静脉穿刺置管手术画面的边缘化特征, 而边缘节点以外的图像区域则被逐渐削弱, 特定情况下也可被完全舍弃。在实际图像分割过程中, 由于多种不可控因素, PICC 智能穿刺医疗机器人的操作手可能会处于多个位置状态, 不仅会造成灰度像素的区域性覆盖, 也可能导致手术画面图像出现严重的模糊化问题^[13]。设 u_0 代表手术画面的最小图像边缘特征值, u_1 代表手术画面的最大图像边缘特征值, $f(X)$ 代表与超声图像相关的格式转换定义式, X 代表固定节点处的像素灰度值, 联立上述物理量, 可将 PICC 智能穿刺医疗机器人控制系统超声图像的画面边缘检测表达式定义为:

$$S = \frac{\left| \int_{u_0}^{u_1} K(-X)f(X)dX \right|}{L \sqrt{\int_{u_0}^{u_1} f^2(X)dX}} \quad (1)$$

其中: K 为机器人控制系统所能承受的最大图像节点检测测量, L 为与已获取静脉穿刺置管手术画面相关的超声波输出条件。

3 新型微创运动模型分析

基于超声图像预处理理论, 在靶向血管位置信息、穿刺规划路径等多项参量条件的作用下, 完成 PICC 智能穿刺医疗机器人的运动控制模型分析。

3.1 靶向血管位置信息获取

在控制系统的设计中, 将操作手运动点作为 PICC 智能穿刺医疗机器人的主控点运动变化参照物。在建立适当坐标系环境的基础上, 将靶向血管位置信息作为既定节点的参考条件, 当操作手关节信息得以清晰表达时, 控制系统

显示器中便可呈现出清晰的超声图像画面。对于系统操作端而言，机器人操作手作为手术工具运动变化的参照物，机器人穿刺执行末端受控点在靶向血管坐标系下的位置变化情况，受到操作手坐标与超声图像原始坐标的共同影响^[14]。因此，为准确获取静脉穿刺置管手术靶向血管的位置信息，必须同时确定机器人操作手的正、逆向运动学定义式。设 p_x 、 p_y 、 p_z 分别代表静脉穿刺置管手术靶向血管的横向位置坐标、纵向位置坐标与空间位置坐标， \vec{v} 、 \vec{v} 分别代表 PICC 智能穿刺医疗机器人操作手的正向运动学表达式、逆向运动学表达式，联立式 (1)，可将靶向血管位置信息的准确表达式定义为：

$$A = \frac{S \cdot (\vec{v} + \vec{v})^2 \cos \langle \vec{v}, \vec{v} \rangle}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}} \quad (2)$$

式中， $\cos \langle \vec{v}, \vec{v} \rangle$ 代表机器人操作手正向、逆向运动分量夹角的余弦值。

3.2 穿刺路径规划

机器人穿刺路径规划以已获取的靶向血管位置信息作为支持，在多个空间坐标系的作用下，实现对手术患者的穿刺置管处理。出于平稳性考虑，PICC 智能穿刺医疗机器人与控制系统位于同侧，在明确患者手术部位后，令机器人操作手执穿刺针深入靶向血管内部^[15-16]。在此过程中，针头插入、针体偏转、机器人手执控制、进入血管等行为都遵循相同的坐标参考形式，即以相对水平的横向方向作为 x 轴，以垂直 x 轴的纵向方向作为 y 轴，以空间上同时垂直于 x 轴、 y 轴直线的正方向作为 z 轴。在已规划穿刺路径内，除被手术患者外，其它所有控制主体都具备自由行动的能力，但机器人操作手的运动范围相对受限，始终不能超过由手术超声图像最大、最小画面边缘特征值所决定的物理区间。穿刺路径规划原理如图 4 所示。

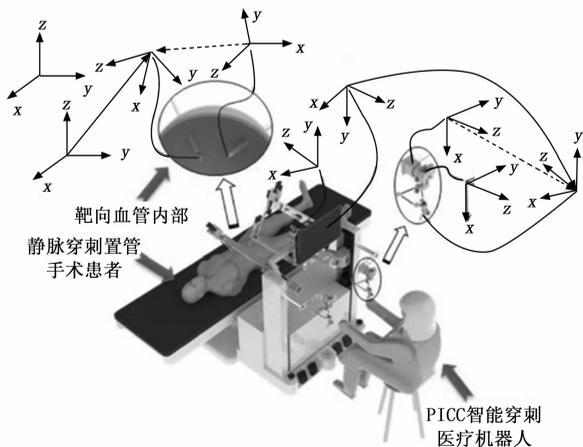


图 4 穿刺路径规划原理

3.3 操作手重定位

操作手重定位是对 PICC 智能穿刺医疗机器人控制范围的再次界定，在超声图像的支持下，可将实际穿刺进针行为分为多个方向（如图 5），并根据舒适运动空间与边界运动空间的具体配比关系，确定可准确实施穿刺行为的物理

控制范围。根据已获取的靶向血管位置信息可知，机器人操作手的舒适运动空间越大，实际受控范围的覆盖面积也就越大；运动边界线越长，实际受控范围的覆盖面积也就越大^[17-18]。总的来说，上述两项物理条件，都可以对机器人操作手重定位行为起到一定的促进性影响。至此，完成各项理论性研究及硬件设备结构连接，在可获取稳定超声图像画面的情况下，实现 PICC 智能穿刺医疗机器人控制系统的顺利应用。机器人操作手重定位控制范围如图 6 所示。

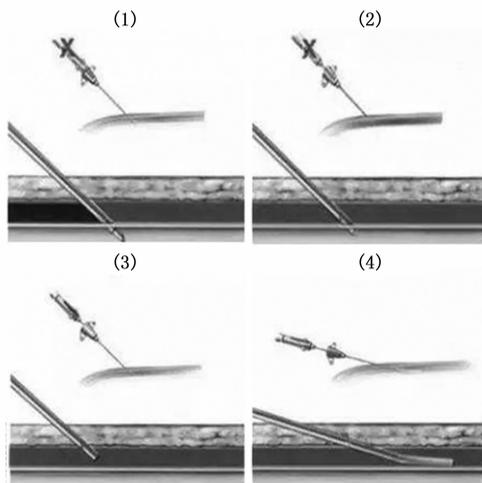


图 5 进针角与进针深度控制

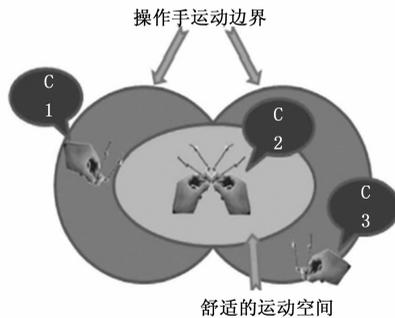


图 6 机器人操作手重定位控制范围

4 实验结果及分析

为验证基于超声图像 PICC 智能穿刺医疗机器人控制系统的实际应用价值，设计如下对比实验。在既定手术区域内选取一受控点作为手术实施位置，分别应用新型 PICC 智能穿刺医疗机器人和常规静脉穿刺手段对患者进行手术处理，前者作为实验组、后者作为对照组，如图 7 所示。多次变更穿刺操作中的 x 轴、 y 轴与 z 轴坐标，将机器人操作手置于最合理的手术范围区间内，截取指定时长作为实验时间，分别记录在该段时间内，实验组、对照组穿刺进针角度与进针深度的实际变化情况。

图 8 反映了 80 min 的实验时间内，实验组、对照组实际穿刺进针角度的变化情况。

分析图 8 可知，实验组穿刺进针角平均数值水平最

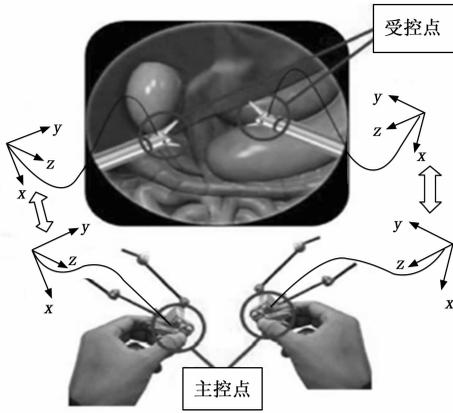


图 7 静脉穿刺置管手术超声图像

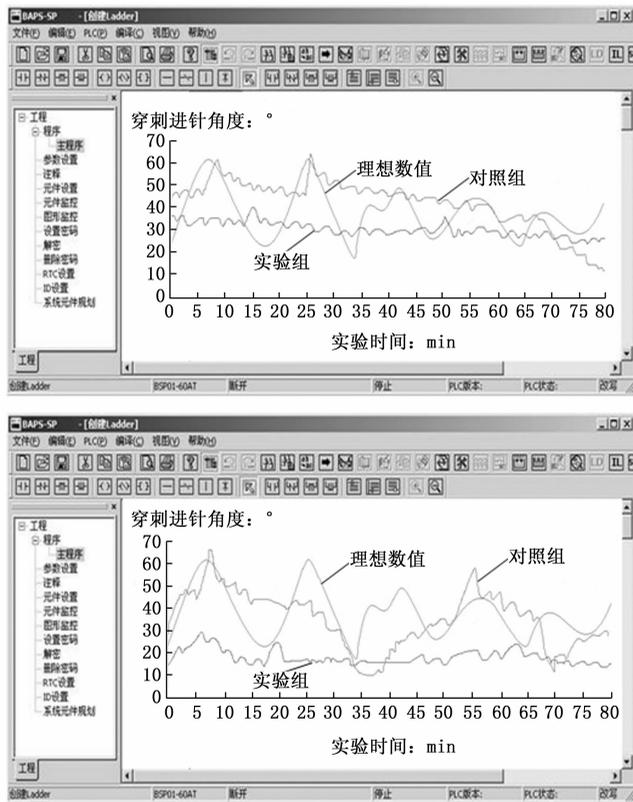


图 8 穿刺进针角度对比图

低，在整个实验过程中的角度最大值始终不会超过 40° ；对照组穿刺进针角平均数值水平最高，在整个实验过程中的角度最大值基本能达到 70° ，与实验组极值相比，上升了近 30° 。实验组穿刺进针角度的数值水平较为稳定，全局最小值始终高于 10° ，两端极值之间的差值水平也仅能维持在 30° 左右；对照组穿刺进针角度的数值水平相对不稳定，全局最小值可低至 10° 左右，两端极值之间的差值水平可达到 60° 。

表 1 反映了实验组、对照组穿刺进针深度的实际变化情况。

表 1 穿刺进针深度对比表

针头原长/cm	实验时间/min	穿刺进针深度/cm		
		实验组	对照组	理想数值
20	5	10.8	18.3	15.0
	10	10.5	18.9	
	15	11.2	18.6	
	20	10.7	19.2	
	25	11.9	19.0	
	30	12.6	18.4	
	35	12.2	17.8	
	40	13.1	18.5	
	45	12.4	17.9	
50	13.0	18.7		

分析表 1 可知，理想状态下的穿刺进针深度始终等于针头原长的 $3/4$ ；而实验组进针水平相对较低，极大值也始终未达到针头原长的 $2/3$ ；对照组进针水平较高，极大值达到 19.2 cm ，与针头原长极为接近。

综上所述，随着基于超声图像 PICC 智能穿刺医疗机器人控制系统的应用，静脉穿刺置管手术的进针角度与进针深度都得到有效控制，可大幅降低手术给病人带来的生理性疼痛。

5 结束语

与常规静脉穿刺手段相比，新型控制系统按照超声图像的边缘特征形式，获取靶向血管的位置信息，再联合晶振复位电路、智能传感器等多个硬件执行结构，实现对穿刺进针路径的集中性规划。从实用层面来看，由 PICC 智能穿刺医疗机器人所操作手术的进针角度不超过 40° 、进针深度也不会超过针头原长的 $2/3$ ，能够在缓解病人所承担生理性伤痛的同时，提升穿刺置管手术的成功几率，符合实际应用需求。

参考文献:

- [1] 程 翀, 郭晓彬, 陈祥磊, 等. 基于 Mindstorms 的智能机器人控制系统开发 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2018, 42 (2): 83-88.
- [2] 张 鹏, 高 放, 双 丰. 基于 ROS 的全向移动机器人控制系统的设计与实现 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018 (7): 94-97, 101.
- [3] 李艳东, 朱 玲, 郭 媛, 等. 基于径向基函数神经网络的移动机器人多变量固定时间编队控制 [J]. 信息与控制, 2019, 48 (6): 649-657.
- [4] 徐海鹏, 杨兰均, 张志远, 等. 脉冲变压器磁芯重复频率复位电路的研究 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30 (1): 117-121.
- [5] 倪晓宇, 崔瑞龙, 刘 威, 等. 基于 TMS320F28035 + DRV8412 两相混合式步进电机驱动电路设计 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (7): 36-40.
- [6] 匡 志, 杜博超, 徐 浩, 等. 十五相永磁同步电机的驱动控制与容错运行 [J]. 电工技术学报, 2019, 034 (013): 2734-2743.