

基于虚拟安全操作平面的机器人粒子植入规划方法与实验研究^①

梁 艺^{②***} 雷传杰^{**} 许德章^{***} 汪步云^{*} 张永德^{***} 许 勇^{****}

(* 芜湖安普机器人产业技术研究院有限公司 芜湖 241007)
(** 安徽工程大学机械与汽车工程学院 芜湖 241000)
(*** 哈尔滨理工大学智能机械研究所 哈尔滨 150080)
(**** 中国人民解放军总医院泌尿外科 北京 100039)

摘 要 采用机器人辅助医生完成粒子植入手术,其机器人末端定位精度、安全操作性能以及自动化程度,对临床应用有非常重要的意义。本文在搭建了粒子植入机器人实验系统的基础上,研究了机器人位置闭环控制算法,并提出了一种基于虚拟安全操作平面的粒子植入规划方法,该方法避免机器人操作事故和减小手术时间、能耗。结合虚拟安全操作平面策略、Hopfield 神经网络最短路径搜索以及 6 步循环粒子植入运行程序这 3 个过程,设计了安全可靠、人机协助的智能化前列腺粒子植入机器人控制系统上位机控制软件。完成了粒子植入精度评估实验,粒子在 x 向放置精度相对较高,在 y 向和 z 向位置误差分别为 0.25mm 和 0.34mm,粒子整体的放置精度误差为 0.84mm,粒子植入操作时间(和医生对比)减小了 60% 左右。

关键词 位置闭环,虚拟安全操作平面,粒子植入,机器人

0 引 言

近距离放射性治疗(Brachytherapy)是一种局部精确性放射治疗技术,它是在超声、CT、MRI 影像设备引导下,借助于粒子植入器和导向模板将核素¹²⁵I (¹⁰³Pd、¹³¹Cs)粒子布置到肿瘤靶区,通过近距离放射 γ 射线对肿瘤细胞进行杀死^[1,2]。2015 年全球有 880 万人因癌症死亡,占全球死亡人数的 1/6。在中国,每年新发癌症病例达 429 万,占全球新发病例的 20%,死亡 281 万例^[3]。近距离放射性治疗应于治疗泌尿生殖系统肿瘤,例如超声引导早期前列腺癌治疗具有不错的疗效^[4]。适用于无法根治切除(RP)或者外照射效果不佳的胸部肿瘤,以及治疗放、化疗后局部复发或转移乳腺癌患者^[5]。对于治

疗消化系统肿瘤,例如肝癌、胰腺癌的临床意义也逐渐被认可^[6]。采用 CT、MRI 引导近距离放射性治疗,能有效控制肿瘤的局部复发,避免正常神经组织损伤,为颅内肿瘤治疗提供了一种新的有效方法^[7]。

粒子在规划靶点下精准快速地放置,可以减少反复穿刺的次数和手术时间,提高靶区剂量学均匀分布度和手术效率,减少术后并发症。课题组前期为了改善机器人操控穿刺针的定位精度,提出了一种基于振动和旋转的高精度进针策略,用于减少针介入前列腺中,前列腺会产生漂移、变形以及针尖会产生偏转等问题^[8]。为了避免机器人操作事故和减小手术时间、能耗,本文主要研究一种基于虚拟安全操作平面的粒子植入规划方法。该方法以机器人位置闭环控制为基础,融合虚拟安全操作平面策略、

① 国家自然科学基金青年基金(61741101),安徽省高校科学研究重大项目(KJ2018ZD014),安徽省科技攻关计划(1604a0902125),安徽省自然科学基金(1608085QF154),安徽省重点研发计划(1804a09020036),芜湖市科技计划项目(2018yf55)和安徽工程大学引进人才科研启动基金(2017YQQ008,2015YQQ005,2017YQQ015)资助项目。
② 男,1985 年生,博士生;研究方向:医疗机器人系统设计与理论分析;联系人,E-mail: liangyi@ahpu.edu.cn
(收稿日期:2018-03-16)

Hopfield 神经网络最短路径搜索算法以及 6 步循环粒子植入运行程序展开。目前关于粒子植入规划的研究很少涉及以上 3 个方面,特别是基于虚拟安全操作平面的粒子植入规划还没有相关参考文献。

关于机器人位置闭环控制方面,Podder 等^[9]研究了一种多通道图像导航前列腺粒子植入机器人系统,利用光学编码器实时反馈伺服电机角位移,结合 PID 控制方法实现单个线性关节的闭环位置控制。Joseph 等人^[10]研究了一种形状记忆合金的柔性针穿刺定位控制系统,利用电磁跟踪仪实时跟踪针尖位置,结合非线性 PID-P³ 控制算法对针尖位置进行闭环位置控制。解明杨^[11]研究了机器人光镊细胞手术操作系统,提出了饱和的 PID 控制策略实现细胞位置精确控制。

关于粒子植入规划方面,Podder 等人^[12]针对研制的 EUCLIDIAN 前列腺粒子植入机器人系统,提出了采用机器人完成粒子植入临床工作流程,文中在规划好的靶点后,进行粒子植入任务前,需要医生干预进行确认,粒子植入的路径是按照深度搜索算法进行笛卡尔空间排列。2016 年, Garg^[13]采用 Acubot-RND 前列腺近距离治疗机器人系统完成单通道斜偏穿刺路径规划,提出了通道布置算法(channel layout algorithm),对导向板标记点到目标靶点的斜偏姿态和路径进行规划,利用 3D 打印技术定制带斜直孔的导向模板进行定向穿刺。

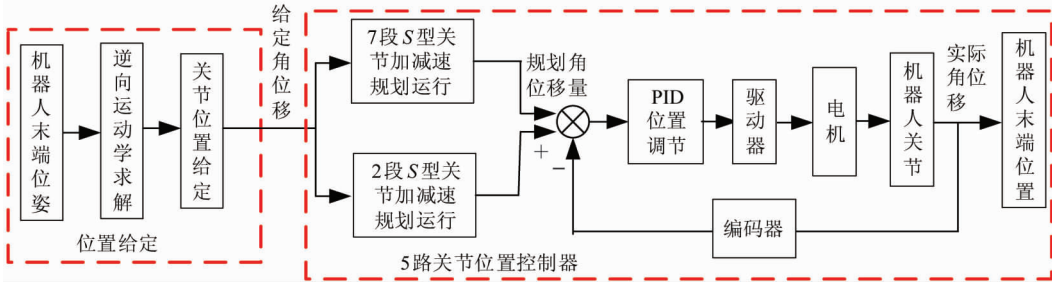


图 2 机器人笛卡尔位置控制

通过运动学逆解将笛卡尔空间转化到关节空间,只需对 5 路关节实施位置控制,也能实现机器人末端定位的控制。采用 S 加减速规划结合 PID 算法实现的位置闭环控制,加减速规划可以减少运行时间和提高运行效率,PID 算法可以提高关节定位精度。

以上研究的位置闭环控制技术都能提供机器人末端的定位精度,但结合粒子植入规划算法以及提高机器人在手术操作过程中的安全性,将会具有重要的临床意义。基于此,本文提出一种基于虚拟安全操作平面的粒子植入规划方法,该方法旨在提高粒子植入的精度和安全操作性能,减少粒子植入的时间,提高手术效率。

1 机器人位置闭环控制算法

本文在建立前列腺粒子植入机器人实验系统(见图 1)的基础上,进一步研究了该机器人位置控制方法,如图 2 所示。

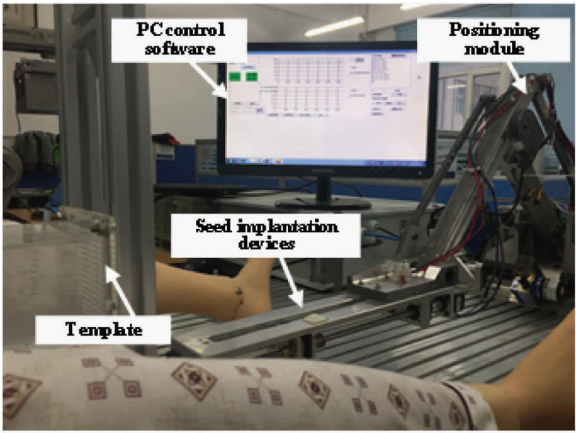


图 1 粒子植入机器人实验系统

图 3 是单关节位置 PID 闭环控制框图,对于电机控制,一般采用增量式 PID 控制,避免 $u(k)$ 累积误差偏大引起的错误控制^[14],同时利用一阶差分形式表示误差、输入值的变化量,其控制律为
$$\Delta u(k) = K_p \{e(k) - e(k - 1)\} + T_i e(k) + T_d \{e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)\} \quad (1)$$

式中, k 、 $u(k)$ 、 $e(k)$ 分别是离散采样序列, 图 3 中 θ_d 、 θ_r 分别为目标角位移和实际角位移。

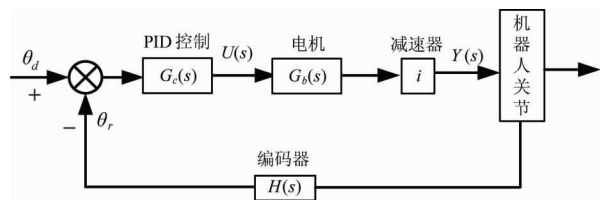


图3 单关节位置PID闭环控制

将式(1)中 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 重新合并和化简如下:

$$\Delta u(k) = A_1 e(k) - A_2 e(k-1) + A_3 e(k-2) \quad (2)$$

式中, T 是系统采样周期, $A_1 = K_p(1 + T/T_i + T_d/T)$, $A_2 = K_p(1 + 2T_d/T)$, $A_3 = K_p T_d/T$ 。

传统的PID控制,在关节启动和停止操作时,短时间内系统的输出误差较大,会造成PID运算的积分累积,从而引起系统的超调和振荡^[15]。为了改善关节位置控制的稳定性,引进积分项的开关系数。图4是改进PID控制算法流程图,改进增量式PID控制律:

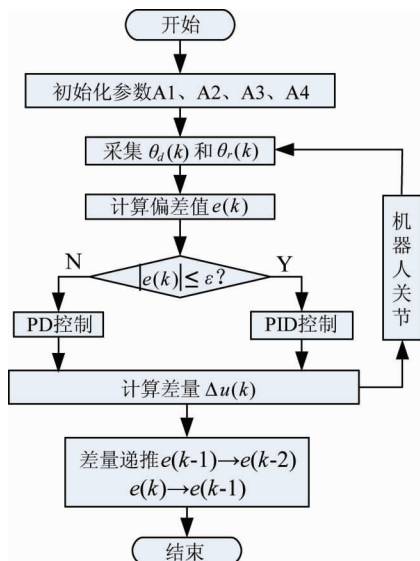


图4 改进PID控制算法流程图

$$\Delta u(k) = A_4 e(k) - A_2 e(k-1) + A_3 e(k-2) \quad (3)$$

式中, β 为开关系数, 满足条件:

$$\beta = \begin{cases} 1 & |e(k)| \leq \varepsilon \\ 0 & |e(k)| \geq \varepsilon \end{cases}$$

$$A_4 = K_p(1 + \beta T/T_i + T_d/T)。$$

2 机器人粒子植入规划方法

在完成机器人运动学建模^[16]、关节空间位置闭环控制基础上,下面主要研究机器人粒子植入规划方法。主要内容包括:机器人虚拟安全操作平面策略,Hopfield神经网络粒子植入路径搜索以及粒子植入规划程序设计等内容。

2.1 机器人虚拟安全操作平面策略

考虑到机器人安全操作问题,设定基于虚拟安全操作平面的机器人控制策略示意图如图5所示。定义机器人基坐标系为 $o-xyz$, 虚拟安全操作平面 F_1 定义:与基坐标系 xoy 平面平行,且与导向模板左平面 F_2 沿 z 向的安全距离为 30mm 之内,并且设定 F_1 与 xoy 平面沿 z 向的公垂线距离 z_0 为调整参数。图中 TCP 为植入器工件中心坐标系原点,并根据该机器人运动学正解计算 TCP 原点 z 向位置分量 z_p , 比较实时解算 z_p 与调整参数 z_0 大小,设定相应的机器人运动控制策略。

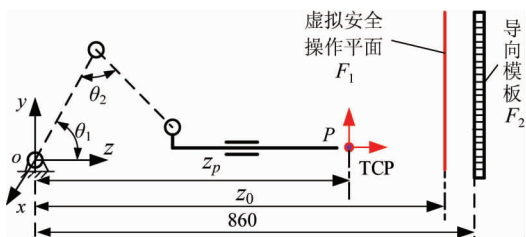


图5 基于虚拟安全操作平面示意图

当给定粒子植入任务后,机器人上电回零到标定零点。将规划粒子植入坐标带入运动学逆解方程中,求出需要跟踪的大、小臂关节角位移量 θ_d 。通过位置闭环跟踪控制机器人到达规划靶点,将实时跟踪大、小臂关节角位移 θ_r , 带入到运动学正解方程实时计算 TCP 原点 z 向位置分量 z_p 。比较 z_p 与 z_0 大小关系,给出如下运动控制策略。

(1) 如果 z_p 小于 z_0 , 大、小臂关节和内、外针都可以操作,也就是机器人 TCP 原点在虚拟安全操作平面 F_1 左侧区域时,机器人的大、小臂和内、外针始

终可以同时通过关节位置闭环实时跟踪到目标位置,其机器人关节和末端的驱动都不受限制。

(2) 如果 z_p 大于或等于 z_0 ,大、小臂关节停止跟踪并通过程序锁定,而只能通过内、外针移动使机器人 TCP 原点继续跟踪到目标位置,也就是机器人 TCP 原点虚拟安全操作平面 F_1 右侧区域时,大、小臂锁定,而只能操作内、外针。

(3) 在内、外针移动中,还需判断规划坐标 (x_i, y_i) 是否与上一次相同,如果相同,大、小臂继续锁定,仅需要控制内、外针的 TCP 往回退一个粒距,且根据新的 z_i 坐标调整内、外针位置并注射粒子。

(4) 如果规划坐标 (x_i, y_i) 与上一次不相同,首先只能通过内、外针移动控制 TCP 离开导向模板左平面 F_2 ,然后再操作大、小臂和内、外针使 TCP 完全退到虚拟安全操作平面 F_1 的左侧,最后将新坐标 (x_{i+1}, y_{i+1}) 带入到运动学逆解方程中,并重复上述 (1)、(2)、(3) 过程,直至规划靶点全部植入粒子后结束。

2.2 Hopfield 神经网络粒子植入路径搜索

对于一般男性前列腺肿瘤患者,平均 16 针定位穿刺,植入 73 颗 Pd^{103} 粒子(一般数量 55-113)^[17]。采用机器人实施多目标点定位穿刺,需要在导向模板上进行穿刺路径进行规划,属于静态环境下的全局路径搜索问题,采用连续型 Hopfield 反馈神经网络搜索遍历靶点的最短路径,可以减少能耗和提高搜索效率^[18]。

将粒子植入路径规划问题映射成一个神经网络的动态过程,用换位 $n \times n$ 矩阵表示植入 n 个靶点,矩阵中每一行对应一个靶点,且该行中第 i 个神经元输出为 1 时,表示该靶点已经被访问。

例如有 10 个靶点需要植入粒子,被访问的路径为 $p_5 \rightarrow p_2 \rightarrow p_4 \rightarrow p_7 \rightarrow p_9 \rightarrow p_3 \rightarrow p_6 \rightarrow p_1 \rightarrow p_{10} \rightarrow p_8$ 。则 Hopfield 神经网络输出的有效解用二维矩阵如表 1 所示。

表 1 构成了 10×10 的矩阵,该矩阵中每行每列神经元只能有一个元素为 1,其余的全为 0,否则搜索的路径无效。采用 u_{xi} 、 v_{xi} 表示神经元 (x, i) 的输入输出值。假如靶点 x 在第 i 位置上被访问,则 $v_{xi} = 1$,否则 $v_{xi} = 0$ 。

表 1 10 个靶点的访问路径

靶点/次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
p_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
p_3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
p_4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
p_5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
p_7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
p_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
p_9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Hopfield 神经网络求解最优路径动态方程:

$$\frac{du_{xi}}{dt} = - \frac{\partial E}{\partial v_{xi}} = - A \left(\sum_{i=1}^n v_{xi} - 1 \right) - A \left(\sum_{i=1}^n v_{yi} - 1 \right) - B \sum_{i=1}^n d_{xy} v_{y,i+1}$$

(4)

具体搜索流程如图 6 所示。

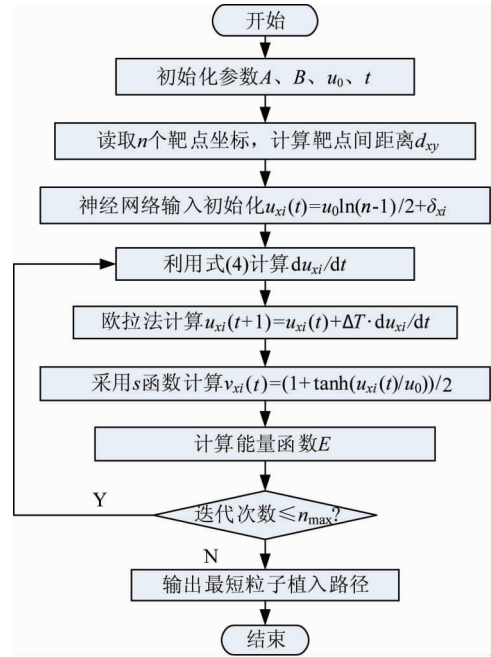


图 6 Hopfield 神经网络搜索最短粒子植入路径

2.3 粒子植入规划程序设计

粒子植入规划和执行位于上位机的顶层,采用 VC#编程语言和 Visual Studio 2013 集成开发环境编写相应的控制程序。图 7 是粒子植入程序设计流程图,图8是设计上位机控制软件。粒子植入过程分

为 3 个部分:(1) 机器人初始化准备工作;(2) 点坐标导入多选列表;(3) 对每一个靶点调用自动植入程序。

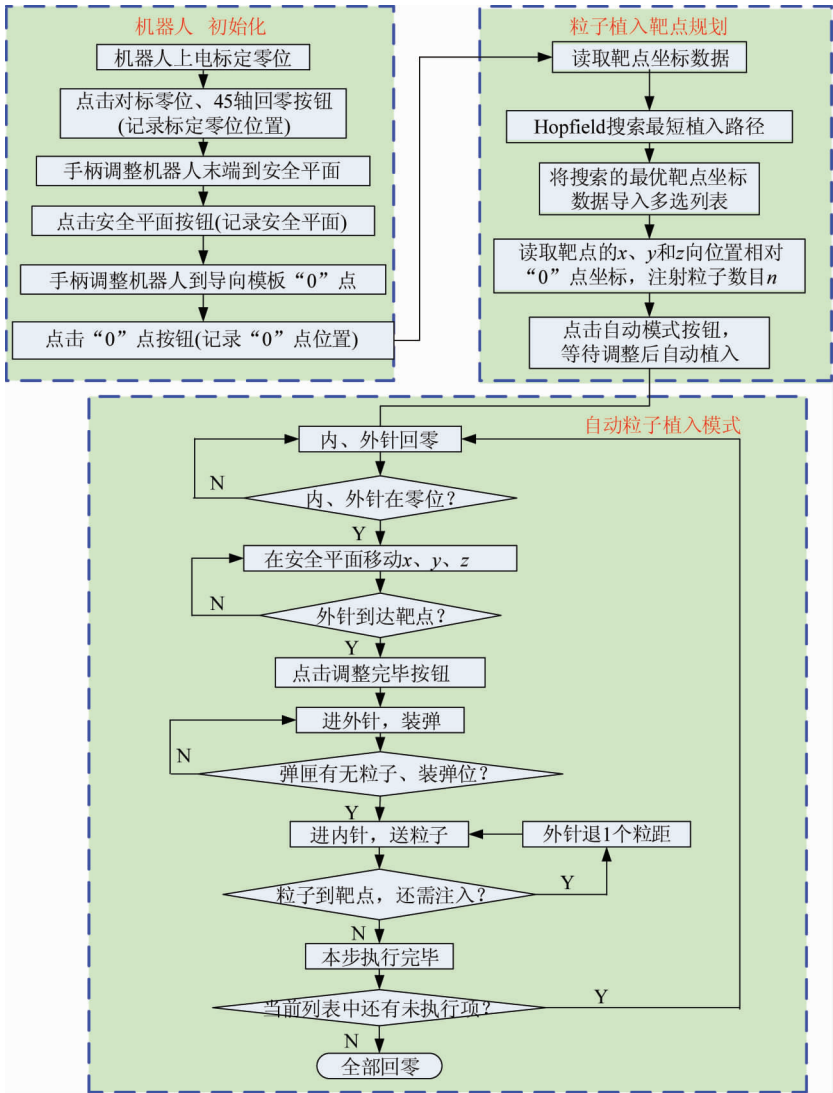


图 7 粒子植入程序设计

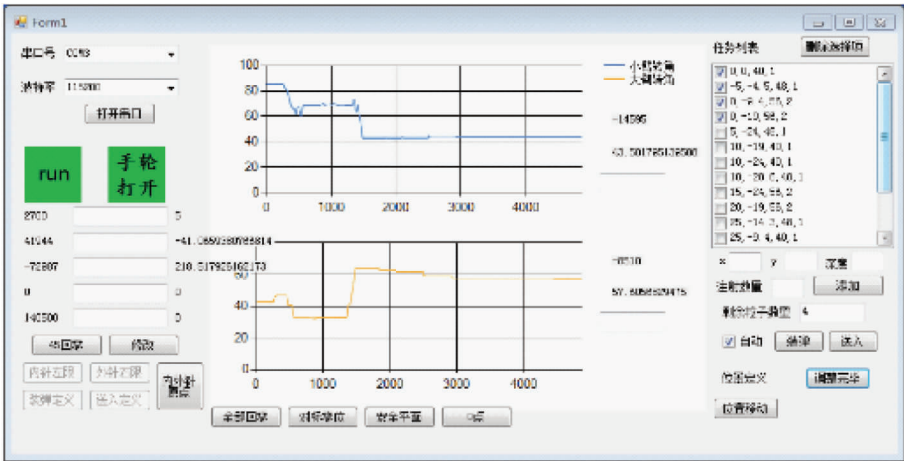
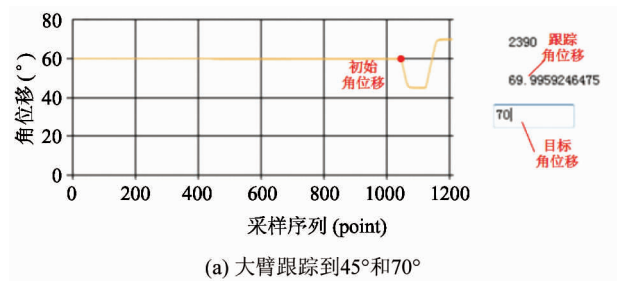


图 8 上位机控制软件

机器人初始化工作中,需要记录机器人的标定零位、安全平面位置以及导向模板的“0”点。粒子植入靶点坐标,通过 Hopfield 神经网络搜索出最短路径后,进行坐标排序并添加到上位机的多项列表中,同时选择自动模式进行植入准备。针对每个靶点项任务,重复执行粒子植入程序。自动执行程序分为 6 步执行,概括如下:

- (1) 内、外针回零操作;
- (2) 在安全平面上移动(x, y, z);
- (3) 进外针,装弹操作;
- (4) 进内针,送粒子操作;

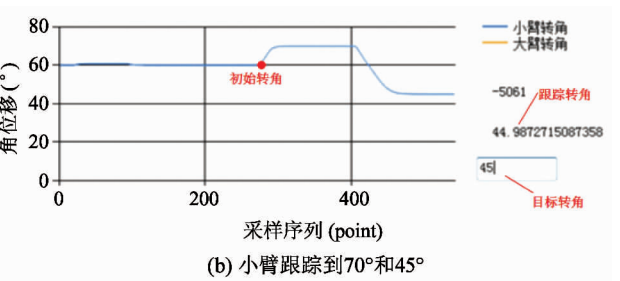


- (5) 内针到达顶出位置,还需注射粒子;
- (6) 无条件重新开始,本步执行完毕。

3 评估实验

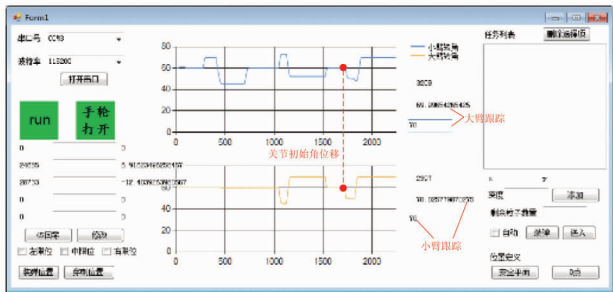
3.1 关节位置闭环跟踪实验

为了验证改进 PID 控制算法有效性,采用该机器人上位机位置控制模块,完成了关节位置闭环跟踪实验。图 9 分别是大、小臂单关节和联动跟踪的实验曲线。



(a) 大臂跟踪到45°和70°

(b) 小臂跟踪到70°和45°



(c) 大、小臂联动跟踪到50°和70°

图 9 大、小臂关节角位移跟踪曲线

由图 9(a)、(b)可知,单关节跟踪时,跟踪的稳态精度达到99.9%。无超调和失步现象。由图 9(c)可知,联动跟踪时,大臂角位移变换曲线较为光滑,小臂在采样点 1800 时发生了抖动,这主要是大臂耦合运动造成的,但是稳态时跟踪精度都达到了99.5%。

3.2 粒子植入精度评估实验

图 10 是美国托马斯杰弗逊大学放射性肿瘤科 Yan Yu 教授提供的前列腺癌患者计量学靶点规划图。表 2 是在导向模板上需要植入粒子的坐标以及粒子数目。

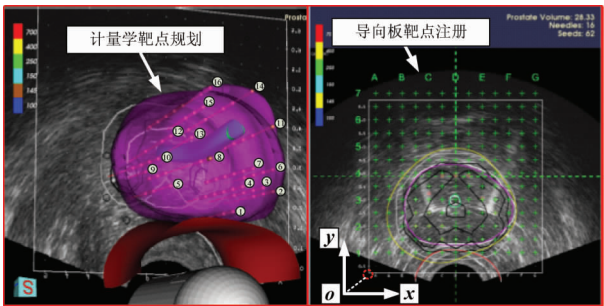


图 10 某位前列腺癌患者治疗计划

采用 2.2 节 Hopfield 神经网络搜索的最短植入路径,坐标的连接顺序如图 11 所示。

表 2 计量学靶点规划坐标

靶点	x (mm)	y (mm)	z (mm)	粒 数	靶点	x (mm)	y (mm)	z (mm)	粒 数
1	20	15	40	1	9	15	30	56	2
2	40	15	48	1	10	20	35	56	2
3	15	20	56	2	11	30	35	48	1
4	25	20	56	2	12	40	35	40	1
5	45	20	48	1	13	25	40	40	1
6	15	25	40	1	14	30	40	48	1
7	20	25	40	1	15	35	40	56	1
8	40	25	48	1	16	30	45	56	2

原始路径长度是218.3575mm,优化后的路径长度是118.5603mm。

参照图 8 的粒子植入上位机控制软件,图 11 的搜索结果依次导入靶点坐标,完成粒子植入实验过程,如图 12 所示。采用 EPSON 扫描仪对假体模型(植入完成)进行 xy 平面、 xz 平面全局扫描,并采用图像处理软件标示出粒子植入位置,采用超景深显微镜 VHX-100 对局部图像进行距离测量,实验结果测量如图 13 所示。

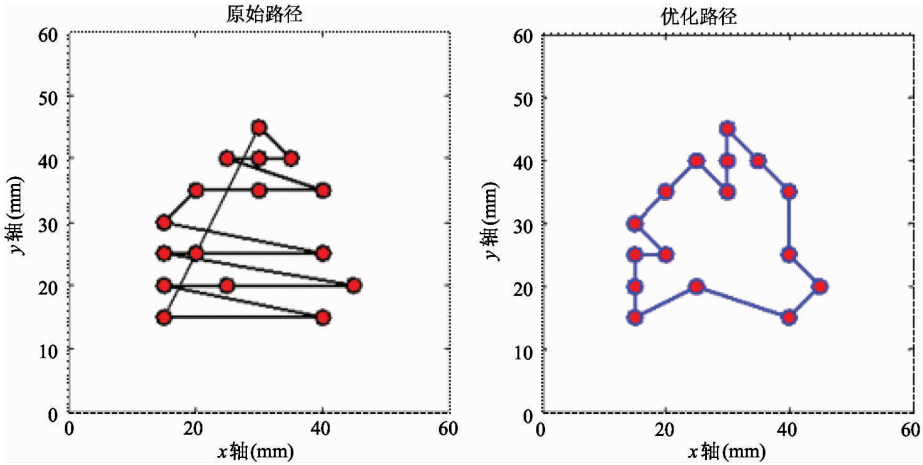


图 11 Hopfiled 神经网络路径搜索结果

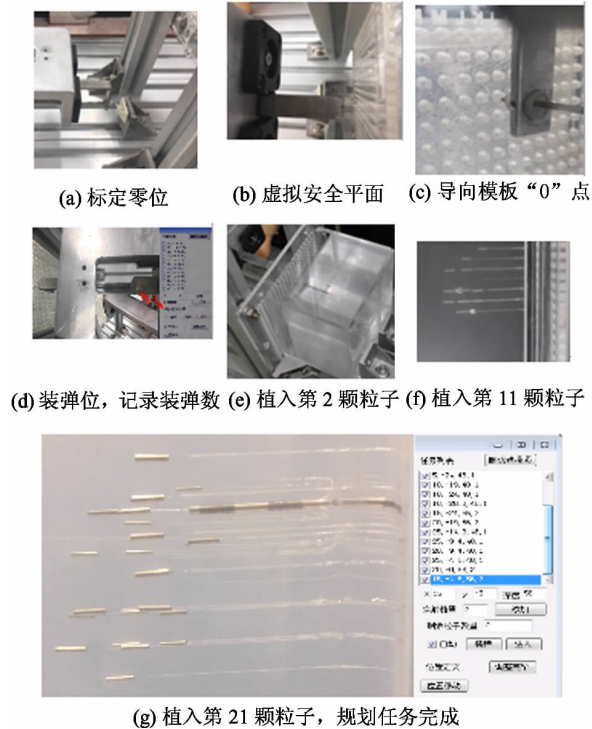


图 12 粒子植入实验的全过程

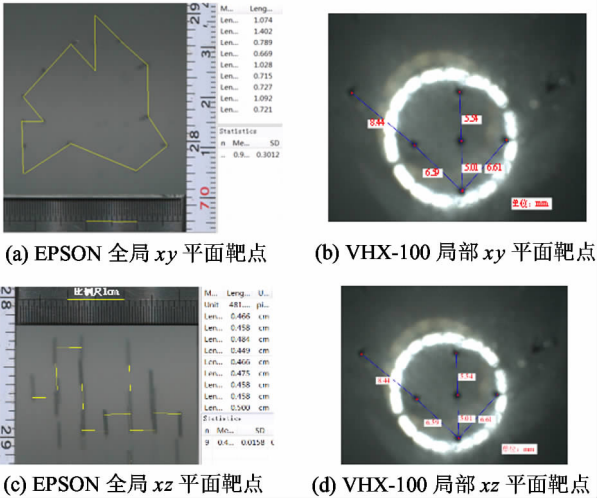


图 13 模型 xy 平面、 xz 平面靶点测量

测量完成后对植入的 21 颗粒子精度进行评估和误差分析。实验结果显示,硅胶模型回弹量接近 8mm 左右,在同一 xy 坐标下,粒子在 x 向放置精度相对较高,在 y 向和 z 向位置误差分别为0.25mm和0.34mm,主要是机器人运动学参数标定误差、硅胶

模型变形造成的。但粒子整体的放置精度误差为 0.84mm,粒子植入时间相对医生操作减小了 60% 左右。

4 结 论

本文在搭建的前列腺粒子植入机器人实验系统的基础上,完成了关节位置闭环跟踪实验和粒子植入精度评估实验。从实验结果中,可以得到以下的结论。

(1) 采用改进的 PID 位置闭环控制算法,单关节跟踪时,跟踪的稳态精度达到 99.9%。无超调和失步现象。联动跟踪时,大臂角位移变换曲线较为光滑,小臂在采样点 1800 时发生了抖动,这主要是大臂耦合运动造成的,但是稳态时跟踪精度都达到 99.5%。

(2) 在研究改进的 PID 位置闭环控制算法基础上,本文提出基于虚拟安全操作平面的粒子植入规划方法,包括虚拟安全操作平面策略、Hopfield 神经网络最短路径搜索以及 6 步循环粒子植入运行程序这 3 个过程。通过对此规划方法,设计的机器人上位机控制软件能实现比较稳定可靠的运行。

(3) 采用本文的粒子植入规划方法,完成的粒子植入精度评估实验,硅胶模型回弹量接近 8mm 左右,粒子在 x 向放置精度相对较高,在 y 向和 z 向位置误差分别为 0.25mm 和 0.34mm,整体放置精度误差为 0.84mm。通过与临床医生手动粒子植入评估对比,发现临床手动粒子植入精度大于 1.5mm,本文方法相对提高了 0.66mm,操作时间减小了 60% 左右。因此本文提出的基于虚拟安全操作平面的粒子植入规划方法,为机器人技术应用到临床近距离放射性治疗手术中奠定了一定的理论基础和应用价值。

参考文献

[1] 张永德,梁艺,毕津滔,等. 前列腺粒子植入机器人运动学建模和仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(2):662-668

[2] 张永德,彭景春,刘罡,等. 基于水平集的前列腺磁共振图像分割方法研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(2):416-424

[3] Siegel R L, Miller K D, Jemal A. Cancer statistics, 2017 [J]. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 2017, 67(1): 7-30

[4] Chin J, Rumble R B, Kollmeier M, et al. Brachytherapy for patients with prostate cancer: american society of clinical oncology/cancer care ontario joint guideline update [J]. *Journal of clinical oncology*, 2017, 35(15):1737-1743

[5] 杜海艳,张永德,赵燕江,等. 斜尖针穿刺软组织建模及针尖轨迹预测[J]. 仪器仪表学报,2015,36(8):1744-1751

[6] 李小东,王荣福. 多模态影像引导 ~(125)I 粒子植入治疗恶性肿瘤的现状与进展[J]. 中国医学装备, 2017,14(4):21-24

[7] Wernicke G, Taube S, Smith A W. Central nervous system brachytherapy[M]. In: *Handbook of Image-guided Brachytherapy*, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017. 539-556

[8] 张永德,张为玺,梁艺,等. 前列腺高精度穿刺机理及策略研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(6):1406-1412

[9] Podder T K, Buzurovic I, Yu Y. Multichannel robot for image-guided brachy-therapy[C]. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on BioInformatics and Bio-Engineerin*, Philadelphia, USA, 2010. 209-213

[10] Joseph F O M, Kumar M, Franz K, et al. Control of shape memory alloy actuated flexible needle using multimodal sensory feedbacks[J]. *Automation and Control Engineering*, 2015,3(5):428-434

[11] 解明扬. 应用机器人光镊细胞手术系统研究生物细胞微米级操控[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016. 86-91

[12] Podder T K, Beaulieu L, Caldwell B, et al. AAPM and GEC-ESTRO guidelines for image-guided robotic brachytherapy: report of task group 192 [J]. *Medical Physics*, 2014,41(10):101501-101527

[13] Garg A, Siauw T, Berenson D, et al. Robot-guided open-loop insertion of skew-line needle arrangements for high dose rate brachytherapy[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013,10(4):948-956

[14] Du S W, Feng Z L, Zhang F M. Design of improved PID algorithm for position control of servo unit[C]. In: *Proceedings of the Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering*, Chengdu, China, 2010.

333-335

[15] 李杰,齐晓慧,韩帅涛. 四种先进 PID 控制方法及性能比较[J]. 计算技术与自动化,2012,31(3):19-24

[16] 梁艺,许德章,汪步云,等. 重力补偿式前列腺粒子植入机器人设计与分析[J]. 高技术通讯,2018,28(4):362-368

[17] Kumar R,Le Y,Deweese T,et al. Re-implantation follow-

ing suboptimal dosimetry in low-dose-rate prostate brachytherapy: technique for outpatient source insertion using local anesthesia [J]. *Journal of Radiation Oncology*, 2016,5(1):103-108

[18] 张华烨. 基于 Hopfield 网络的路径规划并行算法设计与实现[D]. 广州:华南理工大学,2016. 26-30

Seed implantation planning method and experimental study of robot based on virtual safety operation plane

Liang Yi^{***}, Lei Chuanjie^{**}, Xu Dezhang^{***}, Wang Buyun^{**}, Zhang Yongde^{***}, Xu Yong^{****}
(^{*} Wuhu Ahpu Robot Technology Research Institute Co. LTD, Wuhu 241007)
(^{**} School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 24100)
(^{***} Intelligent Machine Institute, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)
(^{****} Urinary Surgery, The General Hospital of Chinese People's Liberation Army, Beijing 100039)

Abstract

In the process of assisting doctors to complete the seed implantation surgery by robots, the positioning accuracy, safe operation performance and degree of automation of the robot is very important for clinical application. In this paper, the robot position closed-loop control algorithm is studied. In order to avoid operation accident, reduce the surgery time and energy consumption, a seed implantation planning method based on virtual safety operation plane is proposed. Based on the three steps of the safety plane operation strategy, the shortest path search using Hopfield neural network and the 6-step circular and automatic seed implantation program, a safe and reliable man-machine intelligent PC control software of prostate seed implantation robot is designed. Seed implantation accuracy evaluation experiment are carried out. The seeds have a relatively high accuracy in the direction of x , and the position error of y and z is 0.25mm and 0.34mm respectively. The overall positioning accuracy error is 0.84mm, and the seeds insertion time (compared to doctors' operation) is reduced by about 60%.

Key words: position closed-loop, virtual safety operation plane, seed implantation, robot