

血管介入手术机器人推进机构设计及精度研究^①

罗彪^{②*} 曹彤^{③*} 和丽* 刘达**

(* 北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

(** 北京航空航天大学机器人所 北京 100191)

摘要 根据血管介入手术的需求,研制了一种高精度、高可靠性、可远程操作的新型血管介入手术机器人推进机构,详细论述了其设计理念及机构原理,同时制作出了样机。基于此样机开展了推进机构的精度研究,分析了影响推进机构精度测试实验,实验结果证明了所开发的推进机构满足精度设计要求。

关键词 血管介入, 机器人, 推进机构, 精度研究

0 引言

近年来,尽管国内医疗机器人的研究和开发力度日益增大,能应用于临床的机器人日益增多,但是血管介入手术机器人仍未得到全面发展。因为,目前介入手术由医生人工完成,这就使这种手术存在着很多明显的困难,如医生处于射线工作环境,以及手术技巧性强、风险性高、医生培训时间长等。此外,这种机器人结构复杂,不易消毒,手术过程中的安全性差,尤其是控制精度不高,国外对这种机器人也有初步的研究^[1-3],但效果不甚理想。本文以血管介入手术为背景,开发出了一套结构紧凑,易于消毒,能够实现手术远程操作的高精度的血管介入手术机器人推进机构,用以辅助医生顺利高效地完成复杂的介入手术,并对样机进行了针对性的测试实验,以验证其高精度。

1 设计理念及机构原理

血管介入手术属于微创外科手术,是指医生在先进的数字减影技术^[4]的引导下,操控导管(一种有刚性的软管)在人体血管内运动,对病灶实施治疗,达到栓塞畸形血管、溶解血栓、扩张狭窄血管等目的^[5]。医生在手术过程中对导管的主要操作动作有两个:一是将导管沿着人体的血管往前推进;二是在血管的分支处旋转导管以选择正确的分支。技术熟

练及经验丰富的医生手术时会将导管一边旋转一边推进,实现上述两个动作的合成。

血管介入手术机器人推进机构属于医疗外科手术的辅助执行装置。其主要目的是在射线环境下辅助医生实现对导管上述的两个操作动作或两者的合成动作,并应具备较高的控制精度、稳定性、安全性以及远程操作能力,以实现导管在人体内的推进,达到诊断或治疗的目的。

根据以上的分析,我们对血管介入手术机器人推进机构的设计理念及精度要求等概括如下:

- 机构能够稳定地完成导管的轴向推进及周向旋转;
- 能够实现对导管推进距离的实时检测;
- 具有远程操控的功能;
- 具有较高的安全性和较高的精度;
- 具体精度指标:机构推进导管的相对误差在 2‰ 以内,能够实现对导管 $\pm 1080^\circ$ 旋转;机器人控制导管的定位精度小于 1mm。

针对以上的性能指标,我们设计了一种新型两自由度高精度的血管介入手术机器人推进机构(如图 1 所示),其中两个自由度分别实现对导管的轴向进给和周向旋转。图 1(a)为推进机构的原理图,该推进机构利用摩擦传动的方式实现机构对导管的轴向推进及其周向旋转。推进机构样机如图 1(b)所示,推进机构由进给 A 和检测 B 两个部分组成,其中进给部分又分为轴向进给 C 和周向旋转 D 两个部分。轴向进给部分由步进电机 E 驱动,通过齿轮

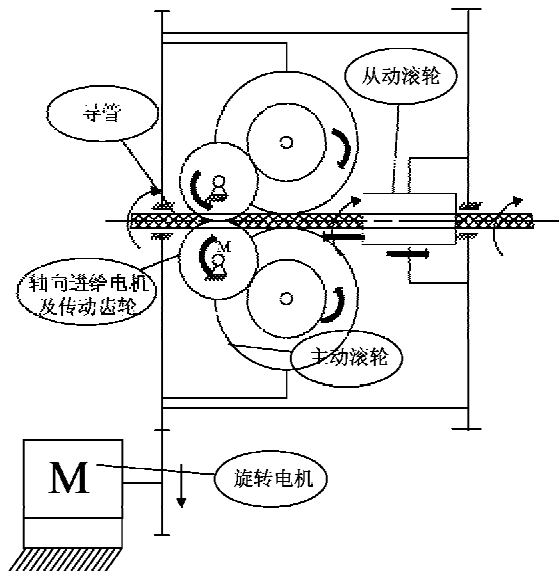
① 863 计划(2009AA04531)和国家自然科学基金(60705033)资助项目。

② 男,1984 年生,硕士;研究方向:医疗外科机器人技术;E-mail: lhng1984@163.com

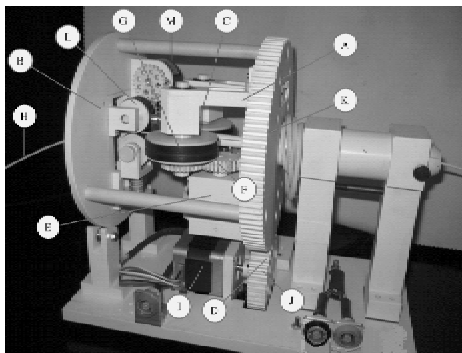
③ 通讯作者, E-mail: caotong1601@yahoo.com.cn

(收稿日期:2009-08-21)

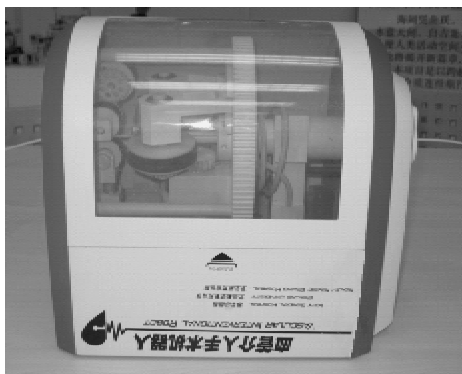
F 将动力传递给主动滚轮 G, 导管 H 的轴向直线运动由导管与滚轮间的摩擦力驱动。同样, 周向旋转部分由步进电机 I 驱动, 通过一对传动齿轮 J 将动力传递给大旋转盘 K, 导管的周向旋转由主动滚轮 G、从动滚轮 L 夹持导管跟随大旋转盘一起旋转。检测部分由光电编码器 M 检测导管轴向进给的实际距离, 结合图像导航的数据给医生的最终决策提供支持。



(a) 推进机构原理图



(b) 推进机构样机



(c) 推进机构整体效果图

图 1 血管介入手术机器人推进机构原理图

同时该推进机构留有与上部机械臂的简易接口以及整个机器人空间的标记点, 便于系统的集成。手术时, 首先由医生将导管前端通过血管鞘送入人体, 然后由该推进机构完成导管在病体内的推进直到到达病灶区域, 避免医生过多的吃线。该推进机构体积小, 结构紧凑; 操作和维护方便; 模块化设计有利于消毒处理; 摩擦传动的方式有利于过载保护; 推进精度高。

2 推进机构精度研究

介入手术对医生操作的熟练程度有很高的要求, 作为介入手术的辅助执行装置, 血管介入手术机器人必须具备很高的精度、稳定性及其安全性能。

2.1 影响推进机构精度的因素

该推进机构属于两自由度的机器人末端执行器, 其两个自由度分别用于实现机构对导管的轴向推进和周向旋转, 其中轴向推进部件与检测部件形成整体, 联接在周向旋转部件的大齿轮盘上, 并且导管的轴线与旋转部件重合, 因此在导管的运动过程中推进和旋转互不影响。

通过对推进机构驱动方式的理论分析判断及其对样机初步的测试实验, 我们分析了影响推进机构精度的主要因素做出了如下判断:

(1) 推进机构的摩擦传动方式使得主、从动滚轮与导管间产生滑移, 是影响机构精度的主要原因;

(2) 推进机构齿轮传动所产生的冲击及其齿轮间的啮合状况也会影响机构的精度;

(3) 轴向进给部件的变中心距的齿轮传动, 在改变中心距的过程中, 必将导致齿轮啮合状况的变化, 在实现导管前后推进的转换时产生误差;

(4) 机构驱动电机与传动部件间的相对滑动也会对机构的精度产生很大的影响;

(5) 机构周向旋转时, 步进电机的脉冲驱动方式产生的振动现象影响了推进机构的精度, 甚至威胁到手术的安全性。

以上判断概括了影响机构推进精度的各个因素, 其中滚轮与导管间的相对滑动和机构的振动是影响精度的两个最为重要的因素。下面将通过实验研究的方法来验证推进机构的精度是否符合设计要求。

2.2 推进机构的精度测试实验

为了验证机器人的精度及其稳定性, 我们以上述推进机构为平台, 对其各项性能指标进行了针对

性的测试实验。

由于血管介入手术机器人的研究刚刚起步,目前国际上还没有公认的血管介入手术机器人控制精度定义,但是对于外科手术机器人来说其控制精度是极其重要的,为此本文给出了血管介入手术机器人控制精度的初步定义,并在此定义的基础上测试了机器人的各项精度指标,以验证机器人的高精度。

在测试实验中我们用到的导管型号为 5F,导管的实际直径约为 1.7mm,推进速度为 15.8mm/s,主动滚轮直径 d_z 为 50.4mm,从动滚轮直径 d_c 为 25.5mm,电机步距角为 0.018°,电机每周脉冲数为 20000,编码器线数为 2500P,4 倍频,编码器每周脉冲数为 10000。

2.2.1 机构轴向推进精度的测试实验

机构轴向推进精度主要测试机构在给定的速度下导管直线进给距离的相对误差。其具体的方法是在给定脉冲数和给定速度的情况下,实现机构对导

管的轴向推进,测量记录导管的实际推进距离 S_s 、理论推进距离 S_l 、检测推进距离 S_j ,比较三者之间的相对误差,看是否满足设计要求。其中实际距离由测量得到,理论距离和检测距离从推进机构的上位机控制软件读取。下面给出它们与给定脉冲数 P_g 、检测脉冲数 P_j 、主动滚轮直径 d_z 、从动滚轮直径 d_c 间的关系。

理论推进距离:

$$S_l = \frac{P_g \cdot \pi \cdot d_z}{20000} \tag{1}$$

检测推进距离:

$$S_j = \frac{P_j \cdot \pi \cdot d_c}{10000} \tag{2}$$

在以上条件下我们在 0~20000 个脉冲内平均取了 10 组脉冲值进行测试,记录了导管推进理论距离、实际距离和检测距离值如表 1。每组脉冲数重复测量了 20 次,取其平均值作为最终值,并绘制脉冲数-位移曲线如图 2。

表 1 导管推进精度测试实验数据

编号	给定脉冲数 P_g	理论推进距离 S_l (mm)	检测推进距离 S_j (mm)	实际推进距离 S_s (mm)	理论检测距离的 平均值 S (mm)
		$S_l = \frac{P_g \cdot \pi \cdot d_z}{20000}$	$S_j = \frac{P_j \cdot \pi \cdot d_c}{10000}$		
1	2000	15.83	15.562	15.72	15.696
2	4000	31.65	31.30	31.42	31.475
3	6000	47.48	46.978	47.28	47.229
4	8000	63.30	62.664	63.11	62.982
5	10000	79.13	78.448	78.92	78.789
6	12000	94.95	94.258	94.62	94.604
7	14000	110.78	110.142	110.521	110.461
8	16000	126.60	125.692	126.1	126.146
9	18000	142.43	141.582	142.1	142.006
10	20000	158.26	157.388	157.94	157.94

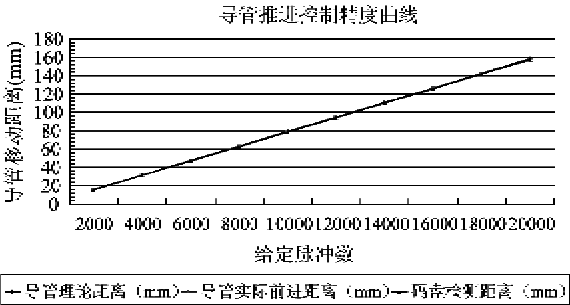


图 2 导管推进精度曲线:脉冲数-位移曲线

误差分析基于以上 3 个被测量,即理论距离 S_l 、实际距离 S_s 和检测距离 S_j 。

理论距离 S_l 与实际距离 S_s 之间的误差 ϵ_l 反映了在各种因素综合影响下,主动滚轮推进导管完成动作后产生的误差。

理论距离与实际距离相对误差为

$$\epsilon_l = \left| \frac{S_s - S_l}{S_s} \right| \times 100\% \tag{3}$$

实际距离 S_s 与检测距离 S_j 之间的误差 ϵ_j 反映了在各种因素综合影响下,导管完成动作时带动从动轮转动产生的误差。

检测距离与实际距离相对误差为

$$\epsilon_j = \left| \frac{S_s - S_j}{S_s} \right| \times 100\% \tag{4}$$

在误差分析的过程中我们发现实际距离与理论

距离间的绝对误差值均为负数,而检测距离与实际距离间的绝对误差值均为正数,分析其误差产生的主要原因是滚轮与导管间的相对滑动。因此在主动滚轮驱动导管进行轴向进给时,若主动滚轮与导管间出现相对的滑动,即导管的实际位移量比滚轮边缘的旋转位移量小,那么理论距离就会比实际距离大;相反,在编码器检测导管实际位移时,导管的直线运动是主动运动,而从动滚轮的旋转是被动运动,那么在导管与从动滚轮间出现相对滑动时,导管的实际位移值比从动滚轮边缘的旋转位移值要大,即实际距离值要比编码器检测的检测距离值要大。通过以上的分析我们可以得到以下关系:理论距离 $S_l >$

实际距离 $S_s >$ 检测距离 S_j 。而在实际手术的过程中导管实际推进的距离值(即 S_s)是无法测量的,但是为了给医生的判断提供数据上的支持,我们必须实时提供导管的实际距离值。为此我们引进了理论距离与检测距离的平均值 S , 以其代替导管的实际距离值。与理论距离和检测距离一样,我们也定义了理论距离与检测距离平均值与实际距离的相对误差 ϵ :

$$\epsilon = \left| \frac{\frac{S_l + S_j}{2} - S_s}{S_s} \right| \times 100\% \quad (5)$$

根据表 1 的数据计算出各自的相对误差值如表 2 所示。

表 2 各相对误差计算结果(%)

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值
ϵ_l	0.70	0.73	0.42	0.30	0.27	0.35	0.23	0.40	0.23	0.20	0.38
ϵ_j	1.01	0.38	0.64	0.71	0.60	0.38	0.34	0.32	0.36	0.35	0.51
ϵ	0.15	0.18	0.11	0.27	0.17	0.02	0.05	0.04	0.07	0.07	0.11

由导管推进控制精度曲线可知,导管的推进距离与给定脉冲数成正比关系,且导管的理论距离曲线、检测距离曲线和实际距离曲线基本重合,说明导管在推进的过程中导管与主、从动滚轮间的相对滑动很少,没有出现严重的打滑现象,符合最初的设计理念。另外在对实验数据进行处理和计算相对误差时,我们得到检测距离 S_j 与实际距离 S_s 的相对误差为 0.51%,理论距离 S_l 与实际距离 S_s 的相对误差为 0.38%,理论距离、检测距离平均值 S 与实际距离 S_s 的相对误差为 0.11%。由此可以得出,在实际手术的过程中,用理论与检测的平均值 S 与导管实际推进距离值 S_s 具有很好的吻合性,满足设计相对误差为 2‰的要求。

2.2.2 机构对导管定位精度的测试实验

机构对导管的定位精度是推进机构的又一重要的性能指标,是指机构在允许的工作范围内,推进导管到达某一指定点的精度。其测量方法借鉴工业机器人重复定位精度^[6]的测试方法。即重复给定相同的小量脉冲数,测试导管前进距离,绘制次数-距离曲线,确定误差带,由误差带的宽带决定机构推进的定位精度;给出推进精度的误差范围。在实验中我们给定每周脉冲数为 10000 和 5000,各重复测量 20 次,记录导管推进的检测距离,其测试结果如图 3。

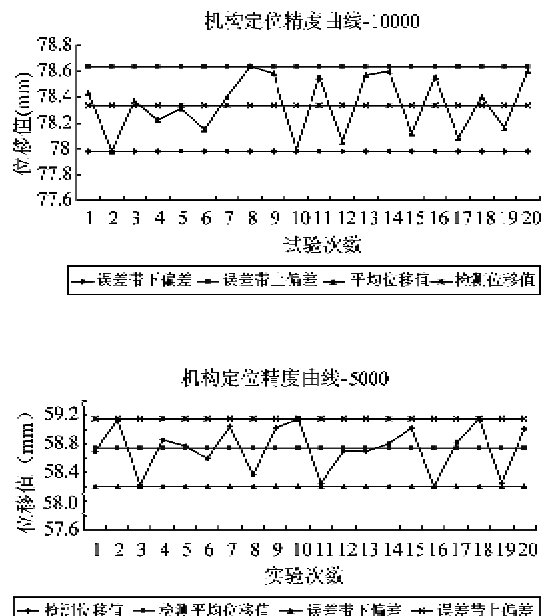


图 3 机构定位精度曲线

由图可知,在对导管进行重复推进的过程中,导管的位移值在一定范围内波动,其波动范围在 77.9mm~78.7mm 和 38.9mm~39.5mm 之间,误差带宽度分别为 0.66mm、0.53mm,满足设计机器人控制导管的定位精度小于 1mm 的要求。

3 结 论

本文设计了血管介入手术机器人的一种能实现远程操作的高精度推进机构,其结构紧凑且易于消毒处理。同时初步给出了血管介入手术机器人控制精度的定义,并分析了影响机构精度的因素。通过测试实验测试了样机推进导管的相对误差、定位精度,其实验结果进一步说明了推进机构样机的合理性及高精度,满足设计的技术指标。本文还通过实验给出了理论与检测平均距离的概念,用以代替导管的实际推进距离(其相对误差在 0.1% 左右),辅助医生做出准确的判断以顺利完成复杂的介入手术。目前本机器人推进机构还处于实验室的测试阶段,后续的研究工作主要是继续进行不断的测试实验及模型实验,为以后的改进及临床实验打下坚实的基础。

参考文献

- [1] Feng W X, Chi C M, Wang H R, et al. Highly Precise Catheter Driving Mechanism for Intravascular Neurosurgery. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference of Mechatronics and Automation, Luoyang, China, 2006. 990-995
- [2] Guo S X, Kondo H, Wang J, et al. A New Catheter Operating System for Medical Applications. In: Proceedings of the IEEE/ICME International Conference Complex Medical Engineering, Beijing, China, 2007. 82-86
- [3] Rafael B, Luis G, Dan D, et al. Remote-Control Percutaneous Coronary Interventions. *Journal of the American College of Cardiology*, 2006, 47(2):296-300
- [4] 李宝民. 介入神经血管内治疗学的现状和发展. 中国全科医学, 2005, 20(8):1653-1654
- [5] 刘新峰. 神经血管内介入治疗——一个值得神经科关注的领域. 中华神经科杂志, 2006, 1(39):7-9
- [6] 孟庆鑫, 王晓东. 机器人技术基础. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006. 12-14

Design of a propulsive mechanism for vascular interventional robots and its precision research

Luo Biao^{*}, Cao Tong^{*}, He Li^{*}, Liu Da^{**}

(* School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

(** Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract

A new-type vascular interventional surgical robot propulsive mechanism which is high-precision, high-reliability and remote-controllable is designed according to the needs of vascular interventional procedures. Design principles and institutions of the propulsive mechanism are described in detail. Accuracy research is carried out based on the vascular interventional surgical robot propulsive mechanism, and the factors that affect the accuracy of propulsive mechanism is analyzed, a series of accuracy experiments are carried out, which validate that the propulsive mechanism satisfies the required design accuracy.

Key words: vascular intervention, robot, propulsive mechanism, precision research