文章编号:1004-2474(2019)01-0106-09

压电作动磁共振兼容手术机器人的研究进展

时运来,林瑜阳,张 军
(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏 南京 210016)

摘 要:磁共振兼容手术机器人及其驱动技术是医疗器械研究领域的热点和前沿。该文对磁共振兼容手术机器人及其驱动技术的研究现状进行综述。首先,介绍磁共振成像技术的特征,然后,阐述磁共振兼容手术机器人的研究进展,比较磁共振兼容手术机器人不同驱动方式的特性,其次,重点介绍了压电作动器驱动的磁共振兼容手术机器人的研究现状,讨论磁共振兼容压电作动器的研究进展,最后,指出磁共振兼容压电作动手术机器人存在的问题和未来的研究方向。

关键词:磁共振成像;磁共振兼容;手术机器人;压电作动器
中图分类号:TN384;TP242.3;TM359.9 **文献标识码**:A **DOI**:10.11977/j.issn.1004-2474.2019.01.026

Recent Development on Magnetic Resonance Compatible Surgical Robots Driven by Piezoelectric Actuator

SHI Yunlai, LIN Yuyang, ZHANG Jun
(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The magnetic resonance (MR) compatible surgical robots and the driven technologies are the hotspots and frontiers in the field of the medical equipment. This paper reviews the state-of-the-art of the MR-compatible surgical robots and the driven technologies. Firstly, the characteristics of the magnetic resonance imaging technologies introduced. Then, the developments of MR-compatible surgical robots summarized. The characteristics of different driven methods of MR-compatible surgical robots compared. Moreover, the research status of magnetic resonance compatible surgical robots driven by piezoelectric actuators mainly introduced. The research progress of magnetic resonance compatible piezoelectric actuators discussed. Finally, the problems of magnetic resonance compatible surgical robots driven by piezoelectric actuators and the prospect of future research summarized.

Key words: magnetic resonance imaging; MR-compatible; surgical robot; piezoelectric actuator

0 引言

全面建成小康社会的目标离不开全民健康这一基础,而健康事业是我国目前面临的一个重大问题。当前,在优质医疗设备大多靠进口而进口医疗器械又很昂贵的现实面前,有待于通过技术创新实现主流医疗器械和装备的国产化,解决看病贵的难题。“十三五”规划中,高端医疗器械和手术机器人的创新发展已被列为国家重点发展的方向之一。

在众多高端医疗器械中,基于实时图像导航的手术机器人是当前研究的重点和热点之一。与传统手术相比,由成像技术引导的手术具有更好的可视性,出色的诊断能力和更好的定位能力。特别是对于肿瘤患者的微创外科手术而言,粒子剂量放置位置的准确性与手术轨迹规划的实现程度密切相关,而手术轨迹规划的精确执行依赖于成像技术的精确导航。当前,外科手术采用的成像手段主要有X线成像(包括CT成像和DSA成像)、超声波成像(US)和磁共振成像(MRI)。各成像手段各有优缺点,其中,MRI技术与其他成像技术相比具有独特的优势。MRI通过在磁场下识别水分子中共振氢原子信号的分布获得图像,与X线相比,MRI无电离辐射,不需注射造影剂,不会对患者及操作者带来放射性伤害。与超声探测技术相比,MRI能提供精确的解剖信息,且X线和超声设备对病变组织边缘分辨率低,这两种影像设备测量出的癌细胞病灶点的影像值与病理结果的匹配度远低于MRI检测结

收稿日期:2018-04-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275235);航空科学基金资助项目(2016ZA52014);江苏高校优势学科建设工程基金资助项目
作者简介:时运来(1976-),男,山东邹城人,副教授,硕士生导师,博士,主要从事压电作动技术及其应用方向的研究。

果的匹配度,在手术时会残留许多小面积的病变细胞,给患者的健康埋下隐患。MRI 提供的信息量大,可以直接显示出横断面、矢状面、冠状面和各种斜面的体层图像。目前,影像导航下的介入性手术所采用的导航方式大多是采用 X 线影像技术,该方式虽然把医生从恶劣的手术环境中解放出来,但患者仍难以避免长时间承受 X 线辐射的状况,这于患者而言更是雪上加霜。为此,开展对人体无伤害的 MRI 导航下的磁共振兼容作动机器人系统的研究非常有意义[1-5]。

医疗机器人的基础理论和关键技术(包括机构、控制、传感、人机交互和材料等)与传统机器人无太大差别,但针对受限空间和特殊环境下的医疗应用,就要摆脱传统工业机器人的"影子",实现机器人"轻量化、精密、灵巧和操作环境兼容性好"的创新设计,而此目标实现的关键是机器人驱动方式的创新。基于 MRI 导航特性的优势,国外众多科研机构开展了 MRI 导航微创手术机器人的研究工作。在磁共振成像环境中,机器人研究面临着受限空间下的机器人构型和强大磁场下的机器人兼容问题。此两方面最后均聚焦在一个问题上,即机器人驱动方式的选择。磁共振的高磁场环境下,铁磁材料形成的涡电流和控制线路所产生的辐射噪声会影响成像质量。因此,含有铁磁材料的设备无法使用,传统电机在高磁场环境下会因受到磁场干涉的影响而失去控制。目前,适合在磁共振环境中应用的驱动主要有液压驱动、气压驱动和压电电机驱动。其中,压电电机是一种基于新型原理的特种电机,不同于传统电磁电机,其无需磁场和绕组,工作所产生的磁场非常小且运行不受磁场影响,具有低速大推力/力矩,质量小,惯性小,响应快,断电自锁和定位精度高的特性。同时,压电电机的结构设计灵活,形状多样(如圆盘形、方形、圆环形、圆柱形等),其效率并不随电机尺寸的减小而大幅降低。这些特点实现了医疗机器人"轻量化、精密、灵巧和操作环境兼容性好"的创新设计特别需求。

自 20 世纪 80 年代开始,日本、以色列、德国、美国等相继开始了压电电机的产业化发展,并逐步在科学研究、工业控制、生物医学工程、航空航天等领域获得了应用。为了满足 MRI 导航下医疗机器人对作动器的需求,德国 PI 公司、以色列 NANOMOTION 公司和美国 ACTUATED MEDICAL 公司专门研究开发了核磁兼容型压电电机产品和相应的利用该类电机产品开发的磁共振兼容装置。自 20 世纪 90 年代开始,国内多家高校和研究机构进行了压电电机的研究工作。到目前为止,基于磁共振兼容需求而开展的磁共振兼容压电电机技术及其在医疗机器人方面的应用研究工作尚处在萌芽阶段。国内一些研究机构研制的多种类型的医疗机器人,为了提高操作精度,常采用混合驱动的方式,除了采用液压驱动或气压驱动方式外,部分采用了压电电机,但由于很难买到国外生产的磁共振兼容压电电机,往往购买到的压电电机的磁共振兼容性并不理想,且其电机的结构形式较单一,不能根据需求进行专门设计。为此,结合医疗发展的应用需求、核磁导航介入机器人对驱动方式的需求和压电电机本身特性与结构设计灵活的特点,开展一种基于压电作动驱动方式的 MRI 导航介入机器人的研究,将具有重大的研究价值和应用价值。

1　磁共振兼容机器人的研究进展

MRI 导航机器人的研究始于 20 世纪 80 年代末。第一台可在强磁场中工作的磁共振兼容机器人由 Masamune 等于 1995 年研制成功。机器人系统采用超声电机驱动,系统框架由聚对苯二甲酸乙二酯(PET)制成,应用于神经外科的针刺动作,实验显示其总体精度约在 3.0 mm[6]。1999 年,Chinzei 等定义了用于描述设备 MR 兼容性的 4 个区域,给出设备影响成像质量的 6 种情况,并提出 MR 兼容机电系统的设计准则[7]。进一步设计了一种用于协助微创手术的磁共振兼容机器人,该机器人采用顺磁材料制成,由超声电机驱动,传感器及其电路与 MR 扫描腔保持一定距离以降低噪声干扰。该机器人不受强磁场影响,其运动对成像基本无影响,在当时显示出极好的磁共振兼容性[8]。自 2000 年开始,众多用于核磁环境的机电设备纷纷出现[9-10],磁共振兼容机电系统的功能范围得到了扩展,如面向神经系统科学研究用的功能型 MRI(fMRI)机电系统[11-13]、面向辅助医疗装置的机电系统(如工具定位器)[14]、微创介入机器人系统[15]、用于 MRI 弹性成像的机械振动器[16]、利用磁场进行药物输送的装置[17]和导管操作装置[18-21]等。

1.1　磁共振兼容机器人的驱动方式

在磁共振兼容机器人系统中,常用的作动系统主要有液压驱动、气压驱动和压电电机驱动。2002 年,Kim 等利用电-液压驱动开发了一种用于肝脏微创手术的磁共振兼容六自由度操作臂[22],可在磁极间距为 450 mm 的开放式核磁成像设备中工作。2008 年,Kokes 等采用液压机构设计了一种用于射频消融治疗的单自由度 MR 兼容针刺机器人[23],阀

体和液压动力单元及其他核磁不兼容的部件置于控制室内，通过液压线路连接到扫描室内，以保证图像和核磁不兼容部件之间不受影响。液压驱动输出力矩大，惯性小，抗干扰性强，但结构复杂，不利于手术机器人的小型化，且由于液体的可压缩性和液压阀的非线性特性，液压驱动方式仅适用于低频应用场合而不适用于高带宽控制的场合。

2006 年，美国 Johns Hopkins 大学研发了在 3T 磁场下工作的执行前列腺针刺手术的核磁导航机器人系统，该机器人采用气动步进马达驱动，脉冲输出均匀，且具有优异的磁共振兼容性，可在受限空间下进行前列腺的活检和粒子植入操作[24]。2008 年，Bricault 等开发了一种基于气动的五自由度穿刺机器人，系统由一个三自由度针夹持器和一个二自由度支架组成，由 4 个驱动器在皮带轮的辅助下实现二自由度支架的运动，每个驱动器均由两个活塞缸体组成[25]。气压驱动相较于液压驱动具有结构紧凑、低成本和洁净的优点，气体的粘度小，流阻和压力损失少，反应速度快，具有良好的自保持能力，但整体刚度低，操作过程中常伴有抖动和过冲现象，控制精度差，移动精度低，不适用于高宽带控制的场合。

压电电机是 20 世纪末发展起来的一种新型电机，它突破了传统电磁电机的概念，无绕组和磁路，不依靠电磁相互作用来转换能量，是一种全新原理和全新结构的电机。其利用逆压电效应，将电能转化成定子振动能，再将材料的微观变形通过机械振动放大和摩擦耦合转换成转子或滑块的宏观运动。压电电机的能量转换过程理论上不产生磁场，不受 MR 强磁场影响，具有优异的磁共振兼容特性，是 MR 环境下较理想的驱动方式。

此外，静电驱动利用介电弛豫原理和电容可变原理，不与 MRI 产生相互干扰，但静电式电机由三相交流高压电源驱动，在外科手术中难以解决相应的电源电路问题[26]。聚合物电致伸缩驱动采用二元聚合物为原料，不需反馈传感器的运动控制，构建材料为塑料，结构简单，成本低，可在 MR 环境中运行而不影响图像质量，但其性能有待进一步探讨[27]。另外，将传统电机和传感器、控制单元等核磁不兼容部件置于远离磁场的位置，通过柔性轴和电缆传递动力和信号，但二者之间动力的传输距离较长，难以保证整理的高刚度和高传动效率[28]。

综上所述，磁共振兼容机器人驱动方式的优缺点如表 1 所示。

表 1 MR 兼容机器人驱动方式特性比较

驱动方式	磁共振兼容性	精度	输出特性	其他
液压驱动	干扰小	较高	输出力大，惯性小	易泄露，效率低
气动驱动	干扰小	低	响应快，力保持特性好	洁净，效率低
静电驱动	驱动电源引起干扰大	高	功率小	小巧，效率高
聚合物驱动	驱动电源引起干扰大	高	响应快，重现性好	小巧
传统电机驱动	电机远离磁场干扰较小	低	传统方法控制	效率高
压电驱动	干扰较小	高	惯性小，响应快，断电自锁	小巧，效率高

1.2 核磁环境下压电作动机器人

自 20 世纪 90 年代始，日本学者便开展了 MRI 导航下基于压电作动器的各种操作机器人的研究[29-36]。2004 年，Hata 等采用日本 Shinsei 公司生产的 USR60 型超声电机开发了一种 MRI 导航下用于肝脏温热疗法的三自由度针刺机器人[32]。该机器人系统的定位精度达到 0.13 mm。整体结构采用不锈钢、铜和陶瓷材料，机器人工作时，MR 成像信噪比（SNR）最大降低了 19.4%，具备了较好的 MR 兼容性。2007 年，Mashimo 等利用球形超声电机开发了一种 MRI 导航的用于活检的三自由度机器人[34]，如图 1 所示。

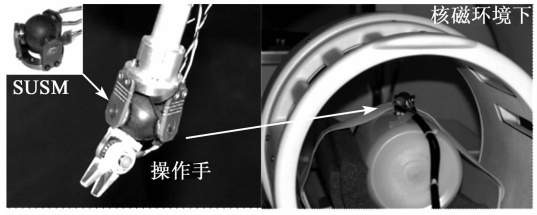
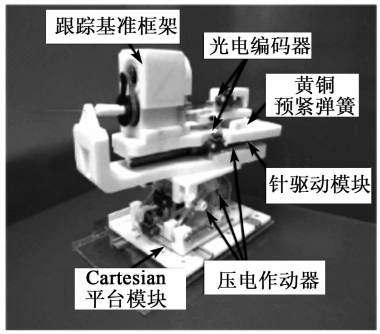


图 1 Mashimo 等研发的 MRI 导航三自由度机器人

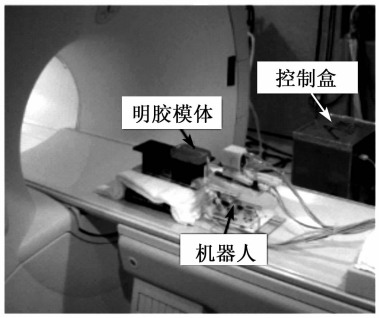
针对核磁环境，对球形超声电机进行重新设计，采用非磁性材料，由 3 个环形定子和 1 个球形转子构成，直径为∅26 mm。电机在 1.5 T 的 MR 环境下开启时，MRI 设备的成像 SNR 降低了 27.6%。2008 年，Elhawary 等采用 PiezoLEGS 公司生产的压电作动器开发了一种用于经会阴前列腺穿刺的三自由度机器人[35]，整体结构采用聚甲醛树脂等材料。机器人工作时，MR 成像 SNR 最大降低了 9.1%。2008 年，Gregory 等针对 Shinsei 公司、Nanomotion 公司的超声电机驱动和汽缸驱动三类

机器人驱动技术的磁共振兼容性进行成像质量对比分析[36],改变控制器的放置位置和磁场强度,分别测量三类电机的 MR 成像 SNR。实验结果表明:气动驱动时成像具有较好的 SNR,压电电机驱动时虽然 SNR 较低,但可以和扫描仪在适当交替工作情况下实现手术操作功能。

近年来,随着压电作动器技术的逐步成熟,以压电作动器作为驱动方式的磁共振兼容手术机器人得到了广泛地发展[37-46]。其中,Khanicheh 等设计了一种基于电流变液的制动装置和压电作动器相结合的微创手术机器人[37],实现了对执行机构输出力与力矩的可控调节及力/触觉再现。Su 等研究了一种基于压电作动器驱动的用于前列腺治疗的六自由度针刺手术机器人[38-39](见图 2),在 3 T 场强的 MRI 设备中,该机器人工作时,对 MRI 的连续实时导航未产生任何影响,MR 成像 SNR 损失在 2% 之内。Raoufi 等开发了一种采用超声电机驱动的 MRI 神经手术针刺机器人[40](见图 3),采用主从机器人操作模式,主平台为六自由度 Stewart 平台,调整针刺角度和入刺点,从操作手实现针刺和针体转动二自由度运动。该机器人能够实现神经手术中的热烧灼消融术、高频消融术及目标点粒子植入等不同功能。

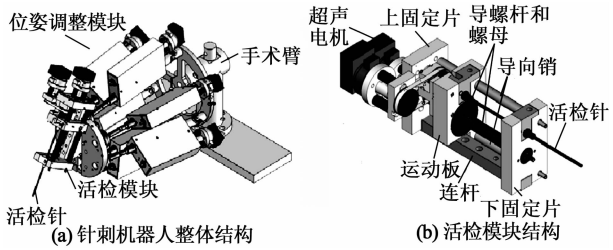


(a) 六自由度压电作动针刺机器人物理样机



(b) 放置于3T MRI扫描腔腔体中的机器人样机

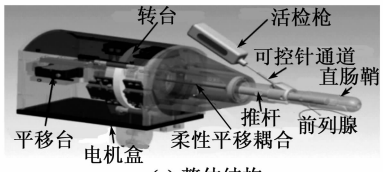
图 2　Su 等研制的压电电机驱动用于前列腺治疗的微创手术机器人系统



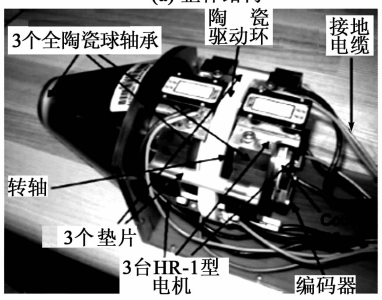
(a) 针刺机器人整体结构　(b) 活检模块结构

图 3　Raoufi 等研制的神经外科针刺手术机器人

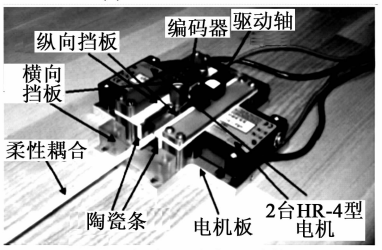
2010 年,Sato 等采用超声电机开发了一种二自由度针刺机器人[41],并采用铝片和金属丝网管对超声电机进行了屏蔽处理,测试结果显示,MR 成像 SNR 最大降低了 1.2%。2010 年,Axel Krieger 等采用 Nanomotion 公司生产的 HR 型压电直线电机开发了一种用于前列腺治疗的针刺机器人[42](见图 4),该针刺机器人采用多台 HR1 和 HR4 型直线压电电机分别实现了旋转运动和直线运动,电机运行时,MR 图像的 SNR 降低 40%～60%。同年,加拿大 Engineering Serverce 公司和 Toronto 大学联合,采用了日本 Shinsei 公司生产的旋转型压电电机开发了一种核磁成像引导五自由度前列腺手术针刺机器人[43](见图 5),在距离磁共振成像设备内腔中心点仅 0.3 m 的位置,其定位误差仍低于 1.2 mm。



(a) 整体结构



(b) 旋转运动实现结构



(c) 直线运动实现结构

图 4　美国 Axel Krieger 等利用 HR 型压电电机开发的手术机器人

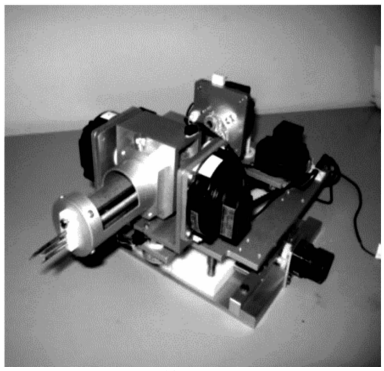


图 5 Andrew 等研制的手术机器人

2015 年，G Li 等研制了一种采用 PiezoLEGS 公司生产的压电电机为驱动装置的 MRI 导航下立体定向神经外科手术机器人系统[47]（见图 6），该机器人系统模仿手动立体定向框架的功能和结构，包括 3 个直线压电电机驱动的笛卡尔坐标直线运动模块，2 个旋转压电电机驱动的旋转运动模块以及 1 个手动导管引导模块，机器人与成像设备同时工作时，系统的 SNR 变化低于 15%，几何失真低于 0.2%，不影响图像功能，定位精度的均方误差仅为（1.38±0.45）mm。2015 年，Fabrizio Sergi 等开发了一种采用行波型旋转超声电机驱动 MR 兼容的手腕机器人系统[48]，如图 7 所示。机器人在 MR 扫描腔内运行轨迹的最大误差在 0.5 mm 以内，具有较好的跟踪性能，但成像质量有一定降低。

图 6 G Li 等研制的针刺机器人

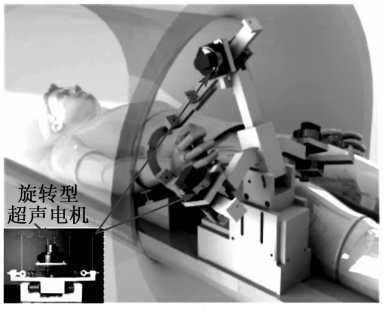


图 7 Fabrizio Sergi 等开发的手腕机器人

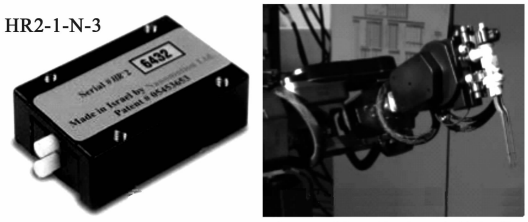
2016 年，Su 等研制了一种压电电机驱动的导管插入六自由度机器人[49]，该机器人可以实现与磁共振成像设备同时工作，且对成像质量的影响可忽略不计。2016 年，Eslami 等研制的一种用于前列腺肿瘤治疗的四自由度针刺机器人[50]，也是采用压电电机进行作动，实验结果表明，压电电机的磁共振兼容性好，且操作精度和可靠性都得到了提高。同年，Tavallaei 等对超声电机驱动的运动平台在核磁环境中的应用进行了评估[51]，平台的定位误差为（0.025±0.021）mm，且不影响成像质量。

目前，国内 MRI 导航介入手术机器人的研究还处于起步阶段。2008 年，洪在地等利用超声电机作为驱动单元进行了一种用于神经外科手术的核磁导航机器人的开发尝试[52]。该机器人采用串、并联模式设计，有 3 个自由度，采用压电电机驱动，可与 MRI 交替工作。2012 年，郭杰等开发了一种基于气缸和超声电机联合驱动的五自由度用于前列腺针刺的手术机器人[53]，针刺精度达到 0.91 mm。孟纪超等开发了一种全气动驱动的六自由度穿刺定位机器人[54]。Yang 和 Jiang 等设计了核磁环境下电机驱动丝传动方式的机器人[55-56]。姜杉等对截至 2012 年的国内外主要的磁共振兼容驱动方式的技术难点进行了总结，并指出该领域的发展方向[57]。目前，国内关于磁共振兼容型压电电机及其驱动的 MR 兼容机器人系统的研究尚未报道。

2 磁共振兼容压电电机的研究进展

压电电机无绕组和磁路，不依靠电磁相互作用来转换能量，原理上适用于核磁环境的驱动，但由于其包含由核磁不兼容材料构成的零部件，传统压电电机在实际运行中依会对核磁成像产生影响。Masamune 等开发了基于超声电机用于肝癌诊断中活检针辅助定位的开放式磁共振兼容机器人，但实验结果表明超声电机造成了 19.4%的图像恶化[58]。Larson 等开发了一个由超声电机驱动的 MRI 导航微创乳腺介入治疗机器人系统，但电机外壳含有核磁不兼容物质，使成像质量受到影响，为此，将电机固定于远离磁场 1 m 的位置，解决了噪声对图像的干扰[59]。Christoforou 等设计了基于超声电机的七自由度外科手术机械臂，并将电机、电源和控制线路置于 MRI 扫描仪所在空间的一个法拉第笼里，用多层铝制护套隔离所有导线，并将产生噪声的部件进行接地保护，实验结果表明电机与 MRI 设备之间不产生干涉[60-61]。

为此,国外一些公司专门开展了用于核磁环境的压电电机的研制工作。以色列 Nanomotion 公司专门设计了 MR 兼容的直线压电电机,并由此研发了一种采用 16 台 HR2 型直线压电电机驱动的应用于神经外科手术的操作手,如图 8 所示。Noliac 公司专门开发了 MR 兼容的旋转型压电电机(见图 9),在磁场强度为 3 T 的西门子核磁成像设备中进行的兼容性测试表明:该电机工作时几乎对成像质量无影响,且该电机在工作时也不受高磁场的影响。法国 Cedrat Technology 公司致力于开发 MR 兼容的微型压电电机(见图 10)。Actuated Medical 公司开发了一种磁共振兼容旋转型压电电机(见图 11),在转速为 100 r/min 时,其输出力矩达到 1.5 N·m,最大堵转力矩达到 2 N·m。压电电机在运行时,对核磁成像会产生一定的影响[36],为此,多位学者通过改变电机材料、调整安放位置等方式,有效降低了压电电机与核磁图像之间的干涉[62-63]。2015 年,Bannan 等开发了一种应用于针刺手术的磁共振兼容二自由度压电作动器[64](见图 12),作动器基于压电蠕动原理,实现尺寸最小化,输出力最大化,同时实现微米级刺入精度,其材料为具有较高刚度和强度的铍铜合金,可实现图像损坏的最小化,提高成像表现,作动器可实现直线和旋转运动,其直线运动速度可达 5.4 mm/s,旋转速度可达 10.5 r/min。2016 年,美国 Soliman A 等对加拿大 Modus QA 公司生产的压电电机在磁场强度为 3 T 的磁共振成像仪的运行效果进行了评估[65],试验结果表明电机运行具有较好的磁共振兼容特性。



(a) 直线型压电电机　　(b) 应用于神经外科手术的操作手

图 8　Nanomotion 研制的 MR 兼容直线压电电机及其驱动的操作手

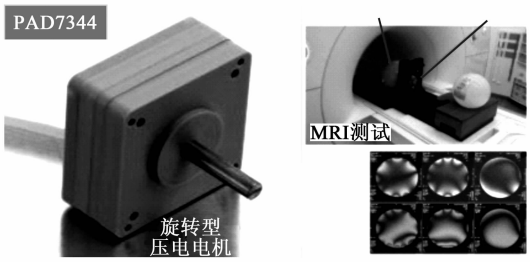


图 9　Noliac 公司生产的 MR 兼容旋转型压电电机及 MRI 测试

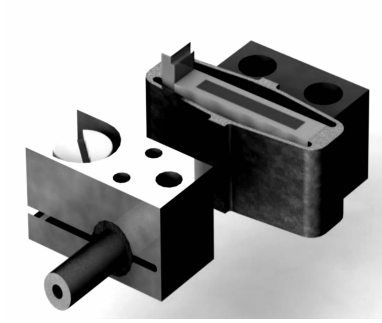


图 10　法国 Cedrat Technology 开发 MR 兼容微型压电电机

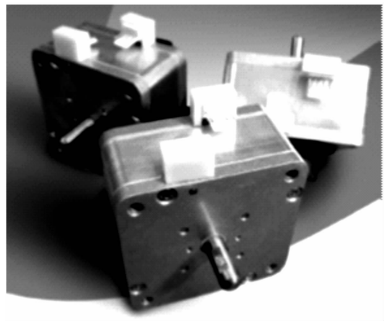


图 11　Actuated Medical 公司开发的 MR 兼容旋转型压电电机

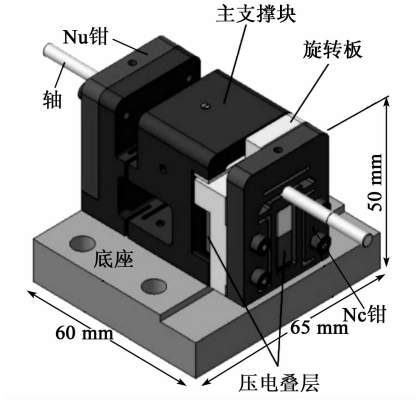


图 12　Bannan 等研制压电针刺作动器

3　总结和展望

综上所述,国内 MRI 兼容介入手术机器人的研究才刚起步,相关技术尚不成熟,需要进一步发展和完善:首先,核磁环境中机器人组件的磁共振兼容性问题是制约其发展的关键要素;其次,核磁环境中操作空间受限问题需要开发更灵巧的新型机构;最后,核磁环境中机器人临床手术的精度问题需进一步提高才能保障手术的安全性。压电电机本身具有的结构特征(结构设计灵活、直接驱动无需减速机构)和独特特性(低磁场产生且工作不受磁场影响,定位精度高,低速大推力/力矩,响应速度快)为上述 3 方面

关键技术问题的解决提供了一个很好的途径。

近年来，基于压电电机的磁共振兼容机器人取得了一定的进展，但仍有部分技术难点有待解决和提高，主要有：

1）具有良好力学性能的抗磁性材料的选取及结构设计。

2）合理屏蔽电机运行时涡电流的影响。

3）保证机器人具有一定精度、灵活性和推力要求的压电电机的总体设计。

压电电机及相应手术机器人磁共振兼容性的提高，可提高医生对 MRI 导航机器人的控制能力，更好地利用 MRI 导航提高手术的准确性和可靠性。由此，磁共振兼容压电作动手术机器人在临床手术领域将具有广泛的应用前景。

参考文献：

[1] YU N，RIENER R. Review on MR-compatible robotic systems[C]//Pisa，Italy：The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics，2006：661-665.

[2] TSEKOS N V，CHRISTOFOROU E，OZCAN A. A general-purpose MR-compatible robotic system[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine，2008，27(3)：51-58.

[3] HAREL N，U G URBIL K，ULUDA G K，et al. Frontiers of brain mapping using MRI[J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging，2006，23(6)：945-957.

[4] LE BIHAN D，URAYAMA S，ASO T，et al. Direct and fast detection of neuronal activation in the human brain with diffusion MRI[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences，2006，103(21)：8263-8268.

[5] 张永德，耿利威，杜海艳，等. 核磁共振兼容手术机器人的驱动方式分析[J]. 机械设计，2010，27(3)：44-49.

[6] MASAMUNE K，KOBAYASHI E，MASUTANI Y，et al. Development of an MRI-compatible needle insertion manipulator for stereotactic neurosurgery[J]. Journal of Image Guided Surgery，1995，1(4)：242-248.

[7] CHINZEI K，KIKINIS R，JOLESZ F A. MR compatibility of mechatronic devices：design criteria[C]//Berlin，Heidelberg：International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Springer，1999：1020-1030.

[8] CHINZEI K，HATA N，JOLESZ F A，et al. Surgical assist robot for the active navigation in the intraoperative MRI：Hardware design issues[C]//Takamatsu，Japan：2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent IEEE，2000，1：727-732.

[9] GASSERT R，BURDET E，CHINZEI K. MRI-compatible robotics[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine，2008，27(3)：12-14.

[10] HEMPEL E，HEMPEL E，FISCHER H，et al. An MRI-compatible surgical robot for precise radiological interventions[J]. Computer Aided Surgery，2003，8(4)：180-191.

[11] HIDLER J，HODICS T，XU B，et al. MR compatible force sensing system for real-time monitoring of wrist moments during fMRI testing[J]. Journal of Neuroscience Methods，2006，155(2)：300-307.

[12] RIENER R，VILLGRATTNER T，KLEISER R，et al. fMRI-compatible electromagnetic haptic interface[C]//Shanghai，China：IEEE Engineering in Medicine and Biology Society，2006：7024-7027.

[13] BURDET E，GASSERT R，GOWRISHANKAR G，et al. fMRI compatible haptic interfaces to investigate human motor control[J]. Experimental Robotics IX，2006，21：25-34.

[14] KRIEGER A，SUSIL R C，MÉNARD C，et al. Design of a novel MRI compatible manipulator for image guided prostate interventions[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering，2005，52(2)：306-313.

[15] SUTHERLAND G R，MCBETH P B，LOUW D F. Neuro Arm：an MR compatible robot for microsurgery[J]. International Congress，2003，1256(3)：504-508.

[16] TSE Z T H，JANSSEN H，HAMED A，et al. Magnetic resonance elastography hardware design：a survey[J]. Journal of Engineering in Medicine，2009，223(4)：497-514.

[17] MATHIEU J B，MARTEL S. Magnetic microparticle steering within the constraints of an MRI system：proof of concept of a novel targeting approach[J]. Biomedical Microdevices，2007，9(6)：801-808.

[18] ROBERTS T P L，HASSENZAHL W V，HETTS S W，et al. Remote control of catheter tip deflection：an opportunity for interventional MRI[J]. Magnetic Resonance in Medicine，2002，48(6)：1091-1095.

[19] SETTECASE F，SUSSMAN M S，WILSON M W，et al. Magnetically-assisted remote control（MARC）steering of endovascular catheters for interventional MRI：A model for deflection and design implications[J]. Medical Physics，2007，34(8)：3135-3142.

[20] LALANDE V，GOSSELIN F P，MARTEL S. Catheter steering using a Magnetic Resonance Imaging system[C]//Buenos Aires，Argentina：Engineering in Medicine and Biology Society（EMBC），2010 Annual International Conference of the IEEE，2010：1874-1877.

[21] GOSSELIN F P，LALANDE V，MARTEL S. Characterization of the deflections of a catheter steered u-

sing a magnetic resonance imaging system[J]. Medical Physics,2011,38(9):4994-5002.

[22] KIM D, KOBAYASHI E, DOHI T, et al. A new, compact MR-compatible surgical manipulator for minimally invasive liver surgery[J]. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2002,2002,2488: 99-106.

[23] KOKES R, LISTER K, GULLAPALLI R, et al. Towards a needle driver robot for radiofrequency ablation of tumors under continuous MRI[C]//Pasadena,CA, USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation,2008:2509-2514.

[24] MUNTENER M, PATRICIU A, PETRISOR D, et al. Magnetic resonance imaging compatible robotic system for fully automated brachytherapy seed placement[J]. Urology,2006,68(6):1313-1317.

[25] BRICAULT I, ZEMITI N, JOUNIAUX E, et al. Light puncture robot for CT and MRI interventions [J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine,2008, 27(3):42-50.

[26] YAMAMOTO A, ICHIYANAGI K, HIGUCHI T, et al. Evaluation of MR-compatibility of electrostatic linear motor[C]//Barcelona, Spain: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 3658-3663.

[27] VOGAN J, WINGERT A, PLANTE J S, et al. Manipulation in MRI devices using electrostrictive polymer actuators: With an application to reconfigurable imaging coils[C]//New Orleans, LA, USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004,3:2498-2504.

[28] TSEKOS N V, YACOUB E, TSEKOS P V, et al. Design of an MRI-compatible robotic stereotactic device for minimally invasive interventions in the breast[J]. J Biomechanical Eng,2004,126(4):458-465.

[29] KOSEKI Y, WASHIO T, CHINZEI K, et al. Endoscope manipulator for trans-nasal neurosurgery, optimized for and compatible to vertical field open MRI [J]. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2002,2002:114-121.

[30] TAJIMA F, KISHI K, NISHIZAWA K, et al. A magnetic resonance compatible surgical manipulator: Part of a unified support system for the diagnosis and treatment of heart disease [J]. Advanced Robotics, 2003,17(6):561-564.

[31] TSEKOS N V, OZCAN A, CHRISTOFOROU E. A prototype manipulator for magnetic resonance-guided interventions inside standard cylindrical magnetic resonance imaging scanners[J]. J Biomech Eng,2005, 127 (6):972-80.

[32] HATA N,OHARA F,HASHIMOTO R,et al. Needle guiding robot with five-bar linkage for MR-guided thermotherapy of liver tumor[J]. Journal of Life Support Technology,2004,16(1):161-168.

[33] HARADA K,TSUBOUCHI K,FUJIE M G,et al. Micro manipulators for intrauterine fetal surgery in an open MRI[C]//Barcelona, Spain: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 502-507.

[34] MASHIMO T, TOYAMA S. MRI-compatibility of a manipulator using a spherical ultrasonic motor[C]// Besançon, France: 12th IFToMM World Congress, 2007:1-6.

[35] ELHAWARY H, ZIVANOVIC A, REA M, et al. A modular approach to MRI-compatible robotics: using robotic modules with interconnectable 1-DOF stages [J]. IEEE Eng Med Biol Mag,2008,27(3):35-41.

[36] FISCHER G, KRIEGER A, IORDACHITA I, et al. MRI compatibility of robot actuation techniques--a comparative study[J]. Med Image Comput Comput Assist Interv,2008,11(2):509-517.

[37] KHANICHEH A, MINTZOPOULOS D, WEINBERG B, et al. MR CHIROD v. 2: a fMRI compatible mechatronic hand rehabilitation device [C]//Noordwijk, Netherlands: IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics,2007: 883-889.

[38] SU H, CAMILO A, COLE G A, et al, High-field MRI-compatible needle placement robot for prostate interventions[J]. Studies in Health Technology and Informatics,2011,163:623-629.

[39] SU H,ZERVAS M,COLE G A,et al. Real-time MRI-guided needle placement robot with integrated fiber optic force sensing[C]//Shanghai,China:2011 IEEE International Conference onRobotics and Automation (ICRA), 2011: 1583-1588.

[40] RAOUFI C, GOLDENBERG A A, KUCHARCZYK W. A new hydraulically/pneumatically actuated MR-compatible robot for MRI-guided neurosurgery[C]// Kunming China: The 2nd IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2008:2232-2235.

[41] SATO I, NAKAMURA R, MASAMUNE K. MRI compatible manipulator with MRI-guided needle insertion support system[C]//Nagoya,Japan:2010 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS),2010:77-82.

[42] KRIEGER A,IORDACHITA I,SONG S E,et al. Development and preliminary evaluation of an actuated MRI-compatible robotic device for MRI-guided prostate intervention [C]//Anchorage, Alaska, USA:

IEEE International Conference on Robotics and Automation,2010:1066-1073.

[43] GOLDENBERG A A, TRACHTENBERG J, YI Y, et al. Robot-assisted MRI-guided prostatic interventions [J]. Robotica, 2010, 28(2):215-234.

[44] SONG S E,TOKUDA J,TUNCALI K,et al. Development and preliminary evaluation of a motorized needle guide template for MRI-guided targeted prostate biopsy[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013,60(11):3019-3027.

[45] MONFAREDI R, SEIFABADI R,IORDACHITA I,et al. A prototype body-mounted MRI-compatible robot for needle guidance in shoulder arthrography[C]//Sao Paulo,Brazil:2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2014:40-45.

[46] SU H,SHANG W,COLE G,et al. Piezoelectrically actuated robotic system for MRI-guided prostate percutaneous therapy[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015,20(4):1920-1932.

[47] LI G,SU H,COLE G A,et al. Robotic system for MRI-guided stereotactic neurosurgery[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering,2015,62(4): 1077-1088.

[48] SERGI F,ERWIN A C,O'MALLEY M K. Interaction control capabilities of an MR-compatible compliant actuator for wrist sensorimotor protocols during fMRI [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015,20(6):2678-2690.

[49] SU H,LI G,RUCKER D C,et al. A concentric tube continuum robot with piezoelectric actuation for mri-guided closed-loop targeting[J]. Annals of Biomedical Engineering,2016,44(10):2863-2873.

[50] ESLAMI S,SHANG W,LI G,et al. In-bore prostate transperineal interventions with an MRI-guided parallel manipulator: system development and preliminary evaluation[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery,2016,12(2): 199-213.

[51] TAVALLAEI M A,JOHNSON P M,LIU J,et al. Design and evaluation of an MRI-compatible linear motion stage[J]. Medical Physics,2016,43(1):62-71.

[52] 洪在地,贠超,赵磊. 用于神经外科手术的磁共振图像导航机器人的兼容性研究[J]. 机器人,2009,31(3): 204-209.

[53] 郭杰,姜杉,冯文浩,等. 基于核磁图像导航的前列腺针刺手术机器人[J]. 机器人,2012,34(4):385-392.

[54] 孟纪超,谢叻,神祥龙. 核磁共振环境下六自由度穿刺定位机器人的研制[J]. 上海交通大学学报,2012,46(9): 1436-1439.

[55] YANG Y, JIANG S, ANG Z, et al. Design and analysis of a tendon-based computed tomography-compatible robot with remote center of motion for lung biopsy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 2017, 231(4): 286-298.

[56] JIANG S, LOU J, YANG Z, et al. Design, analysis and control of a novel tendon-driven magnetic resonance-guided robotic system for minimally invasive breast surgery[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H:Journal of Engineering in Medicine,2015,229(9):652-669.

[57] 姜杉,郑鹏,刘筠,等. 核磁共振环境下机器人驱动及控制传感技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2012, 20(3): 472-483.

[58] MASAMUNE K, OHARA F, MATSUMIYA K, et al. MRI compatible robot for needle placement therapy with accurate registration [C]//Heidelberg, Berlin: World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering,2006,7:3056-3059.

[59] LARSON B T,TSEKOS N V,ERDMAN A G. A robotic device for minimally invasive breast interventions with real-time MRI guidance [C]//Bethesda, MD, USA: Third IEEE Symposium on Bioinformatics and Bioengineering, 2003:190-197.

[60] CHRISTOFOROU E G,OZCAN A,TSEKOS N V. Robotic arm for magnetic resonance imaging guided interventions[C]//Pisa, Italy: The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics,2006:911-916.

[61] CHRISTOFOROU E G,TSEKOS N V,ÖZCAN A. Design and testing of a robotic system for MR image-guided interventions[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems,2006,47(2):175-196.

[62] ELHAWARY H,ZIVANOVIC A,REA M,et al. The feasibility of MR-image guided prostate biopsy using piezoceramic motors inside or near to the magnet isocentre. [J]. Med Image Comput Comput Assist Interv,2006,9(1):519-526.

[63] SUZUKI T,LIAO H,KOBAYASHI E,et al. Ultrasonic motor driving method for EMI-free image in MR image-guided surgical robotic system[C]//San Diego, CA,USA: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007:522-527.

[64] EL BANNAN K,CHRONIK B A,SALISBURY S P. Development of an MRI-compatible, compact, rotary-linear piezo-worm actuator[J]. Journal of Medical Devices,2015,9(1):014501-1-014501-7.

[65] SOLIMAN A,CHUGH B,KELLER B,et al. SU-F-I-15:evaluation of a new MR-compatible respiratory motion device at 3T [J]. Medical Physics,2016,43(6): 3389-3390.