**四维MRI图像引导脑瘤切除手术的相关问题研究**

陶潘鑫，王凌，郑清渠，杨润康

**摘要：**脑瘤对人们健康影响已得到广泛关注，目前脑瘤的治疗方法主要有手术切除与放射治疗。其中，放射治疗的手段已经日益成熟，但其具有延时性，且辐射会对患者造成伤害。因而，在可能的情况下，手术仍然是第一选择。而手术的高风险，及对手术医生经验与判断力的高要求使得发展手术辅助技术显得十分重要。

本课题希望基于现有技术，如开放式核磁共振成像（Open MRI），增强现实（AR）等，设计核磁共振手术台一体设备，帮助实现四维MRI图像引导脑瘤切除手术，缩短手术的时间，同时通过图像引导提高其成功率，从而为降低脑瘤的死亡率提出一种新的可能。

**关键词：**MRI-guided operation，excision of brain tumor，open MRI，augmented reality，medical device

**第一章 背景介绍**

1.1脑瘤治疗的现状

1.1.1脑瘤及其治疗方法

脑瘤(即颅内肿瘤)是指生长于颅内的肿瘤通称，包括脑实质及其邻近组织许多原发肿瘤以及转移癌和肉瘤。实际上包括了几十种脑疾患[1]。

目前关于脑瘤的治疗方法包括手术治疗，放疗，化疗等手段。放疗适用于转移瘤或者原发瘤等的术后治疗，例如生殖细胞肿瘤、神经胶质瘤等，利用术后放疗减少肿瘤的复发。化疗适用于复发频繁的良性肿瘤，对于大脑内部深层放疗无效的肿瘤，可以选择化疗进行治疗。虽然放化疗能有效治疗肿瘤，但会损伤大量正常组织和细胞，具有一定的毒副作用。据世界卫生组织的统计显示，手术、放疗、化疗对于肿瘤治疗的贡献率分别为27%、22%和6%，直接切除肿瘤仍是治疗的主力军。

1.1.2脑瘤切除手术的基本流程

脑瘤切除手术过程一般为：手术治疗开始前，麻醉医生会给患者建好静脉通路，用于给药和输液。在全身流醉后，根据脑瘤的不同部位和大小而采用不同形式的手术在头皮上切口。切开头皮后，用手术钻钻开颅骨，把颅骨翻起暴露颅腔，并用硬膜剪子剪开硬膜。使用相应工具将颅骨取下后进行肿瘤切除。手术治疗结束后，医生会将最初取下的颅骨放回原位，或是用人工骨瓣代替，最后缝合头皮上的手术治疗切口[2]。

手术过程较依赖主刀医生的经验与临场判断，而大脑又极为脆弱，因此脑瘤切除手术有较高风险。

1.2图像引导手术的发展趋势

在分次治疗摆位时和 (或) 治疗中采集图像和 (或) 其他信号, 利用这些图像和 (或) 信号, 引导此次治疗和 (或) 后续分次治疗已逐渐成为现今放射治疗的主流[3]。图像引导放疗 (Image-Guided Radiation Therapy，IGRT) 是一项新的放疗技术, 其能有效地减少放疗间靶区位移误差和摆位误差，监测和校正放疗时肿瘤和正常组织运动引起的误差，高效且准确的实现了实时监测肿瘤或其标志物。而将图像引导应用于临床手术，也成为了当下研究的热点。

1.2.1图像引导手术

图像引导手术，即指医生的手术操作与术中医学影像接近同步进行，使术者能观察到肉眼不能直接观察到的手术视野，随时调整手术操作。其中，术中磁共振成像（iMRI），因其无辐射损伤，软组织分辨率较高等优势，成为了图像引导手术研究的热门方向[4]。

iMRI能够为神经导航提供实时影像，纠正脑组织变形和脑移位误差，提升导航定位精度，提高肿瘤切除率，并防止重要神经血管结构损伤。iMRI的出现完善了导航系统, 它可以评价术中肿瘤切除的程度, 修正手术计划, 引导手术器械精确到达病变部位, 评估各种并发症发生的可能性, 补偿术中脑移位, 尽可能多的切除肿瘤、保护神经功能[5]。

1.2.2图像引导手术的发展趋势

随着磁体和扫描机的基础设计的不断创新，MRI系统已成功进入手术室[6-7]。iMRI逐渐改变了临床手术中，医生凭主观经验指导手术进程、判断手术结果的现状。它与导航系统的结合显著提高了手术的精确性与安全性。放疗过程中MRI也可以利用其出色的软组织分辨能力和纯电磁扫描特性，为临床提供较清晰的实时影像。

将图像引导应用于脑瘤的手术过程，具有可实时监测肿瘤信号的位置，有效增强手术视野影像，减小医生手术时的实验误差，提高切除肿瘤时的精确性，避免手术过程中的误判等多方面优点，是提高手术成功率的一种可行手段。

1.3本课题的选题依据及研究目标

脑瘤对人们健康影响已得到广泛关注，目前脑瘤的治疗方法主要有手术切除与放射治疗。其中，放射治疗的手段已经日益成熟，随着立体定向放射治疗，调强放射治疗等一系列新形式疗法的出现，放射治疗已能做到因症定量，高效准确。然而，放射治疗具有一定延时性，使评价治疗的有效性变得困难。同时，辐射可能引起神经毒素等负面反应，对患者造成伤害。因而，在可能的情况下，手术仍然是第一选择。而手术的高风险，及对手术医生经验与判断力的高要求使得发展手术辅助技术显得十分重要

本课题希望基于现有技术，如开放式核磁共振成像（Open MRI），增强现实（Augmented Reality ,AR）等，设计核磁共振手术台一体设备，缩短脑瘤切除手术的时间，同时通过图像引导提高其成功率，从而为降低脑瘤的死亡率提出一种新的可能。

**第二章 开放式头部MRI手术台**

2.1 开放式MRI

2.1.1开放式MRI成像技术

磁共振成像是一种可产生三维解剖图像的非侵入性的成像技术。人体中水分含量很高，而H2O中的H质子在人体内会产生自旋。所有的质子在自旋时均会产生一个方向不定的磁场，而磁场间相互抵消，因此人体在一般情况下不表现磁性。核磁共振的扫描机器中提供一个强磁场，当人体进入扫描机器中时，体内原本因质子自旋产生的磁场会与强磁场的方向一致，从而整体上表现出磁性。但由于没有横向磁场产生，不能被直接测量，所以需要使用射频系统来扰乱磁场。当射频脉冲与质子自旋频率相一致，便会发生能量传递，质子进入高能状态而使横向磁场强度不断增大。当射频脉冲关闭后，共振的质子会进行“弛豫”，恢复到共振前的方向。在这期间，质子释放出的能量信号会被计算机捕捉，并通过不同的T1（纵向弛豫时间）与T2（横向弛豫时间）显示出不同的亮暗程度。由于弛豫时间的快慢与质子密度有关，所以不同组织的T1、T2值差异较大，计算机在接收到信号后可以以此绘制出清晰的人体图像。[8-9]

对于开放式MRI，已有文献表明，用特定的上下超导线圈、铁轭、匀场环、极板设计在合适的位置上时，可以很好的解决对高精度磁场的控制问题，使设备可以在保持开放性的前提下也拥有高磁场[10]。同时，MRI成像的分辨率与磁场的稳定与均匀度有关，而拥有高稳定与高均匀度的开放式MRI系统可以显著替身成像质量[11]。

与普通的MRI不同，开放式MRI使用了单边的平面磁体而非螺线管式磁体，整体机器呈半开放性，患者不会被“装进”管子中，接受MRI检查的同时也可以接受外部的医疗介入。

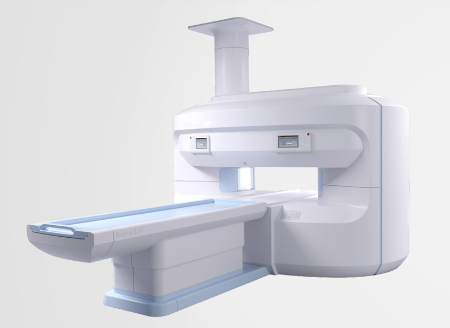
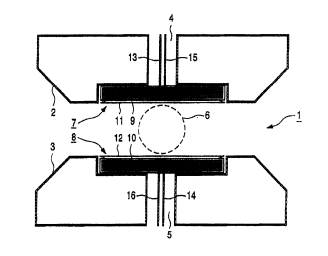
2.1.2开放式MRI在术中的应用

开放式MRI的设计给手术提供了一定帮助，在保证成像清晰的基础上增加了患者的舒适度，也给予了医生一定的操作空间。同时MRI的成像技术可以提供一个更为清晰的患者体内三维空间，相较于医生肉眼的判断更为精准。我们认为，若是能够在进行MRI扫描的同时进行手术，不仅可以避免传统MRI手术室中患者来回移动的时间与不必要的风险，还可以让手术医生更加实时地检测到患者体内的动态情况，从而提高手术的成功率。需要注意的是，由于MRI设备存在强磁场的特殊性，在术中所需的一些器械需要进行一定程度的改造。

2.2 开放式头部MRI手术台

2.2.1基于开放式MRI磁体系统设计的手术台

开放式MRI磁体系统由P·R·哈维伊等人首先提出[12]，该磁体系统具有两个主线圈单元，这两个线圈分别容纳在壳体中，并彼此相隔一定的距离，在壳体之间可放置需要成像的病人（图2.2.1（1））。而国内康达医疗也基于此系统设计出了OSM70A 开放式超导型磁共振（图2.2.1（2）），不仅可以满足一般临床诊断需要，完全替代传统的永磁型磁共振成像系统，其开放性也使其可以用于介入磁共振。



（图2.2.1（1）开放式MRI磁体系统）（图2.2.1（2）OSM70A开放式超导型磁共振）

基于开放式MRI磁体系统，可设计一套普通脑部核磁共振平台与脑瘤切除手术引导平台两用的设备。将上图所示开放式MRI设备中卧具部分设计为可自由拆卸器件，并配备对接的四轮移动设备。在四轮移动设备与开放式MRI设备卧具支撑部分上安装滑轨与固定器件。当卧具固定于开放式MRI设备上时，其可作为头部磁共振成像设备正常工作；而将卧具固定于四轮移动设备上时，可作为移动病床搬运麻醉后的患者；在与开放式MRI设备上的滑轨对接后转移，此时设备可作为MRI图像引导手术平台使用。

2.2.2边缘问题的处理方案

2.2.1中提出的开放式头部MRI手术台可理论上完成四维MRI图像引导手术的设想，但实际应用中还有诸多问题待解决，本部分将着重讨论这些问题。

1，金属手术器材的替代方案

因MRI设备的特殊性，磁性金属物品无法进入磁共振设备间。即使随着开放式MRI技术的发展，MRI设备已可将强磁场控制在特定范围内[13]，手术所需要的手术刀等器材的使用仍会受到影响。钛，钴铬合金，铜等材料虽然不会受到强磁场的影响，但考虑价格，强度等因素，并不适合作为手术刀使用。而纳米陶瓷微晶手术刀方面的研究进展为金属手术器材的替代提供了新的方案。在相关实验中，陶瓷手术刀并未发生破裂，折断等现象，且相对于普通手术刀，实验动物的伤口愈合更快，伤口感染，炎症反应均较轻，同时切口整齐均一[14]。因此，陶瓷手术器材可作为金属手术器材的一种可行替代品，应用于四维MRI图像引导脑瘤切除手术中。

2，手术视野问题

虽然因开放式MRI技术的应用，在进行MRI检查的同时允许了一定医疗介入，但由于MRI设备空间上的局限，手术所需要的视野无法得以保证。

因此，可以在磁体系统上方主线圈外周安装多个摄像头，将光学影像与MRI图像一同输出，并将结果集成于同一交互界面中，以便手术医生。

3，MRI图像遮挡问题

由于开放式头部MRI手术台的应用，若干遮挡问题需要解决，例如手术刀及手术医生手等部位对于患者头部MRI图像的遮挡。由MRI成像的原理，可知上文提及的陶瓷手术刀并不会对成像产生影响，于是不再解释。而对于手术医生肢体的遮挡问题，拟从成像源与图像信号处理两方面着手。

干扰的成像源，即手术医生的肢体，可考虑将其隐藏，不显示在MRI成像中。为此，需要设计一种电磁屏蔽的手套，满足包裹手术医生手与手臂的同时，对手术的精确度仅造成有限的影响。这对材料有着较高的要求，但不失为一种可行的研究方向。

通过图像信号处理去除干扰成像源的图像，可使用图像识别技术，对手术医生的手与手臂进行筛选删除。在此之后再进行伪影的消除，便可得到较为理想的MRI图像。

**第三章 图像引导模块**

3.1 四维MRI在术中导航的应用

术中导航系统，有别于手术导航系统，并非是利用数字化扫描技术（CT、MRI、超声等）所得到的病人术前影像信息，而是更进一步，在手术中明确且实时地显示在病人的三维影像资料从各个方位观察到当前的手术入路及各种参数如角度、深度等，从而最大限度地避开危险区域，在最短的时间内到达病灶靶点，大大减少病人的失血量、手术创伤及并发症，完成真正意义上的精准手术。如今4D-CT 技术已经相对成熟，但由于使用CT这一媒介，在脑中软组织对比度等问题仍然不令人满意。于是4D-MRI应运而生。

在目前看来四维MRI技术在术中导航的应用的发展十分乐观。出现短短几年，便在图像引导放疗，临床医学观察等各个领域产生重大突破[15-18]。因此，有理由相信4D-MRI在治疗脑部疾病的领域也将做出贡献。

3.2 MRI成像时间问题

对于MRI，扫描时间长是一个瓶颈，进行一次MRI扫描所需的时间大约是几十分钟，而最终的成像结果是患者几十分钟前的状态，这将导致医生手术时无法获悉脑瘤的实时情况，对进行手术存在影响。图像引导手术要求成像时间短，成像与手术同步，如何平衡实时成像的需求和MRI要较长扫描时间是一个问题。

3.2.1分区手术切除

对于MRI的扫描结果滞后，不能很好地满足成像与手术同步这一问题，利用MRI可以对特定部位扫描成像的特点，提出“分区手术切除”的方案。

在手术前，将待切除的脑瘤分为1区与2区两个部分，应保证分部截面尽量清晰，每一部分可单独进行手术，且进行手术时对另一部分不存在影响。医生在手术前获得1区的MRI图像，对1区进行手术切除的同时用MRI对2区进行扫描；由于之前1区的手术切除对2区不造成影响，2区扫描成像的结果与实时状态相同。当2区的MRI扫描完成后，医生立即利用MRI成像进行2区的脑瘤手术切除，同时MRI再次对1区进行扫描，以此类推，最终完成手术。该方案中两部分手术利用MRI成像所需的时间平行进行，平衡了MRI所需较长的扫描时间和实时成像的需求。

同时，手术医生可以手动设置MRI扫描的时间点。若医生预估当前部分的手术时间为t0,而MRI扫描成像所需时间为Δt（Δt<t0）,则MRI可以在t0-Δt时刻开始对另一部分进行扫描成像。这样的优化方案最大程度缩短了MRI成像结果与实时情况的时间差，成像结果更符合预期要求。

3.2.2光学影像抓取与MRI成像补偿

MRI成像有较长的滞后，但光学影像可做到实时。利用这一点，可尝试抓取实时光学影像，与间断的MRI成像进行比对，估测实时变化，并修改补偿，以此得到更为精确的MRI图像，实现伪四维MRI。

3.3 增强现实（AR）技术在图像引导中的应用

增强现实（AR）是一种将真实世界和虚拟世界信息集成的新技术，是把原本在现实世界的一定时间空间范围内的实体信息(视觉信息,声音,味道,触觉等),通过电脑等科学技术，将虚拟的信息应用到真实世界，被人类感官所感知，达到超越现实的体验。

AR可以为外科医生提供3D数字图像和实施的关键信息，使外科医生可以在不远离手术区域的情况下获得手术过程中所需的重要信息。比萨大学信息工程系协作研发的视频光学透视增强现实系统能够将X射线数据叠加到病人的身体上，外科医生将在他的视线中获得心跳，血氧等信息。此外，该设备将能够看到手术前和手术过程中获得的医疗信息，并为外科医生提供视图，以准确指导手术（图3.2（1））。



（图3.2（1） AR骨科手术）

运用AR技术将整合后的实时影像与MRI图像同时呈现于主刀医生面前，既能够弥补视野的局限，又能较好地为手术实行进行引导。

**第四章 总结与展望**

**4.1 本文的意义与创新之处**

脑瘤对人们健康影响已得到广泛关注，目前脑瘤的治疗方法主要有放射治疗与手术切除，前者治疗效果有限且伴随着诸多副作用，后者治疗效果彻底但有着较高风险。

随着医疗仪器的进步，图像引导手术逐渐进入手术室。其改变了临床手术中，医生凭主观经验指导手术进程、判断手术结果的现状。图像与导航系统的结合显著提高了手术的精确性与安全性。而其中最为精确，最能够胜任手术引导的成像方式是核磁共振成像（MRI）。MRI软组织分辨度高等特点，使其在脑瘤切除手术的引导中有着较大的优势。

本文希望基于现有技术，如开放式核磁共振成像（Open MRI），增强现实（AR）等，设计核磁共振手术台一体设备，帮助实现四维MRI图像引导脑瘤切除手术，缩短手术的时间，同时通过图像引导提高其成功率，从而为降低脑瘤的死亡率提出一种新的可能。

**4.2 不足与展望**

本文仅提出了核磁共振手术台一体设备的一种设想，并对一些相关问题进行了一定的研究。对于核磁屏蔽手套的材料，光学影像的抓取与补偿算法等问题，本文并未深入探究。而这些问题对核磁共振手术台一体设备的实现也有较为重要的意义。

本课题也还有许多需要改进完善的地方，如MRI成像时间问题并未得到完全合适的解决。而合理的图像引导集成交互界面的设计等实际问题，也是核磁共振手术台一体设备能够投入使用需要考虑的方面。

相信在种种问题得以解决后，核磁共振手术台一体设备最终能够得以实现，并为降低脑瘤的死亡率做出贡献。

**参考文献**

[1] 王沛,张耀圣.第5讲脑瘤[J].中国农村医学,1994(09):9-11.

[2] 方绍明.脑瘤的手术切除[J].科学大众,1965(03):19-21.

[3] 戴建荣,胡逸民.图像引导放疗的实现方式[J].中华放射肿瘤学杂志,2006(02):132-135.

[4] 贾峰涛,杨星,张林,洪军.PET、CT与MRT成像原理及其特点的比较[J].医疗卫生装备, 2005(09):163.

[5] 何康. 术中磁共振导航在功能区胶质瘤手术中的应用[D].郑州大学,2014.

[6] 吴劲松,毛颖,姚成军,庄冬晓,周良辅.术中磁共振影像神经导航治疗脑胶质瘤的临床初步应用(附61例分析)[J].中国微侵袭神经外科杂志,2007(03):105-109.

[7] 任星煜,方向明,陈宏伟.影像引导在胶质瘤导航手术中的应用与研究进展[J].国际医学放射学杂志,2019,42(04):462-465.

[8] 靳二虎，蒋涛，张辉《磁共振成像临床应用入门》

[9] 孙继文.浅析磁共振成像技术[J].临床医药文献电子杂志.2015

[10] 开放式超导磁共振成像技术，王秋良，王晖，戴银明，朱旭晨，许建益，2014.09

[11] 完全开放式磁共振成像磁体的优化设计 谢俊鹏，姚缨英，倪光正，浙江理工大学学报，第23卷，第4期，2006年12月

[12] P·R·哈维伊, J·A·奥维韦格, C·L·G·哈姆,等. 开放式磁共振成像(MRI)磁体系统:, CN1602431A[P]. 2005.

[13] 王秋良,王晖,戴银明等. 开放式超导磁共振成像技术,现代科学仪器,No.6 Dec. 2014

[14] 魏海梁,李京涛,闫曙光,郭辉,杨倩.新型纳米陶瓷微晶手术刀的实验性研究[J].陶瓷,2017(07):47-49.DOI:10.19397/j.cnki.ceramics.2017.07.009.

[15] Yuan J, Wong OL, Zhou Y, Chueng KY, Yu SK. A fast volumetric 4D-MRI with sub-second frame rate for abdominal motion monitoring and characterization in MRI-guided radiotherapy. Quant Imaging Med Surg. 2019 Jul;9(7):1303-1314. doi: 10.21037/qims.2019.06.23. PMID: 31448215; PMCID: PMC6685813.

[16] Zhuang B, Sirajuddin A, Zhao S, Lu M. The role of 4D flow MRI for clinical applications in cardiovascular disease: current status and future perspectives. Quant Imaging Med Surg. 2021 Sep;11(9):4193-4210. doi: 10.21037/qims-20-1234. PMID: 34476199; PMCID: PMC8339660.

[17] Cai J, Chang Z, Wang Z, Paul Segars W, Yin FF. Four-dimensional magnetic resonance imaging (4D-MRI) using image-based respiratory surrogate: a feasibility study. Med Phys. 2011 Dec;38(12):6384-94. doi: 10.1118/1.3658737. PMID: 22149822; PMCID: PMC4108683.

[18] Zarenia M, Arpinar VE, Nencka AS, Muftuler LT, Koch KM. Dynamic tracking of scaphoid, lunate, and capitate carpal bones using four-dimensional MRI. PLoS One. 2022 Jun 2;17(6):e0269336. doi: 10.1371/journal.pone.0269336. PMID: 35653348; PMCID: PMC9162359.