磁导航技术的发展与临床应用

卢云*, 杨树建

青岛大学附属医院胃肠外科, 青岛 266000

* 联系人, E-mail: cloudylucn@126.com

2019-12-29 收稿, 2020-02-20 修回, 2020-02-21 接受, 2020-02-22 网络版发表

国家自然科学基金(81802888)和山东省重点研发计划(2018GSF118206, 2018GSF118088)资助

摘要 21世纪以来,随着工业化水平的不断提高,我们对磁导航系统进行了不断改造,计算机辅助技术、影像学技术等学科的交叉融合,促进了磁导航技术的广泛应用.目前,该技术在心脑血管、消化道和呼吸道的导航中表现出极大的优势.磁导航手术系统作为该技术的操作平台,是多学科技术优化整合的产物.该系统的概念最初于1984年提出,历经四代产品的不断发展,其功能更加完善.与传统操作相比,磁导航技术创伤小、操作简单、治疗效果显著,有效地解决了操作中的空间位阻难题,实现了常规介入手段无法完成的操作.近年来,多中心的临床应用研究表明,磁导航下的血管介入具有更高的成功率,对于复杂病变更具有优势;磁控胶囊内镜明显缩短了检查时间,其检查适应症也进一步拓展;磁导航支气管镜提高肺外周病变的诊断率,在肺外周病变的定位与药物投送中发挥重要作用.尽管磁导航技术具有巨大的优势,但依然存在很多局限性:磁导航技术的应用有一定的适应症,对体内金属植入物可能造成不良影响.典型的梯度磁场无法实现对响应装置的更精确控制,磁控胶囊内镜的观察存在一定的视觉盲区,尚不能实现常规内镜下的治疗性操作.目前,该技术的研究方向集中在控制方式的探索、响应装置的设计以及应用范围的进一步扩展.例如,近年来出现的闭环控制方式、胶囊内镜针刺结构的植入等,以期待实现对响应装置更精确的控制与更多的内镜下操作.本文通过对磁导航技术发展过程的回顾,对其临床应用进行综述.

关键词 磁导航技术, 磁控胶囊内镜, 电磁导航支气管镜, 神经外科

早在2000年前,就有关于磁技术进行医学治疗的记载^[1],人们利用磁铁的吸引力祛除眼中或身体内的金属异物,由于磁铁的磁力较弱,其利用价值有限.21世纪以来,随着工业化水平的不断提高,磁导航系统的结构和功能得到不断的革新,超导磁体、复合磁场的建立促进了磁技术在医学的广泛应用,部分技术表现出了极大的优越性.磁导航(magnetic navigation techniques, MNT)是磁外科(磁外科学)的主要发展方向之一,通过体外磁场引导响应装置沿预定的路径到达目标位置而实现诊断、治疗的目的.磁导航技术包括体外控制磁场和响应装置两大基本要素.体外磁场主要为导航提供动力,已由最初的恒定磁场发展到动态的梯度

磁场;响应装置是最终在体内进行操作的机械结构,我们常通过对响应装置的优化、设计来增强导航系统的功能.目前该技术在心血管介入、磁控胶囊内镜、磁导航支气管镜以及神经外科等领域的应用中效果显著.磁导航技术能够在非接触的条件下实现对响应装置的有效控制,降低了操作难度,缩短了操作时间,减轻了病人的痛苦,使传统方法无法完成的临床技术得以实现,因其独特的优势而受到医学界的广泛关注和研究.

1 磁导航技术的发展

1951年, Tillander^[2]通过在导管头端安装钢制关节头,在体外磁铁的引导下,成功引导动物腹主动脉内的

引用格式: 卢云, 杨树建. 磁导航技术的发展与临床应用. 科学通报, 2020, 65: 1181–1187

Lu Y, Yang S J. Development and clinical application of magnetic navigation technology (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1181–1187, doi: [10.1360/TB-2019-0889](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0889)

导管到达任意一个口径允许的血管内。后来,他又设计了一种中空的磁性导管,实现了对腹腔干和肾动脉的选择性造影^[3]。最初的磁导航技术在二维平面实行,体外永磁体磁力弱,无法提供一个均匀的磁场,因此可操作性较低。超导磁体的出现,增强了体外磁场的强度,通过多层螺线圈叠加产生强大的复合磁场,可更好地控制体内响应装置的移动。基于此,1969年,Yodh等人^[4]和麻省理工学院实验室的同事进行了在磁导航系统辅助下的脑血管介入操作,该系统包括由两个15英寸(1英寸=2.54 cm)的电磁线圈叠加产生的复合梯度磁场,以及一个安装有子弹形磁体的柔性导管。通过对电磁铁的操作对磁性导管产生旋转扭矩和拉力,以实现在血管腔内的导航。此外,他们提出在介入过程中注入造影剂以显示血管路径,并在实时X射线透视下监测导管尖端的位置和方向,为现代磁导航系统的建立提供了依据。1991年,Ram和Meyer^[5]借助婴儿胸外磁体引导聚氨酯导管到达右心房注入造影剂,获得了良好的造影效果,证明了该技术的安全性。磁导航手术系统(magnetic navigation surgery system, MSS)是磁导航技术、影像学技术等多学科交叉融合的产物,其主要包括提供磁场的体外磁体、响应装置、监测设备及记录仪器。具有现代意义的磁导航手术系统概念于1984年提出,该系统体积大、结构复杂,由3个正交电磁矩阵及可任意转动的机械臂组成,中心磁场强度为0.15 T,由于磁体为封闭性结构,空间较小,不适合肥胖患者。第二代MSS系统使用钕铁硼磁固定于操作台的两侧,由于其不能倾斜,限制了X射线机的旋转角度。第三代MSS系统采用非对称的螺线圈组成,超导线圈的体积及冷却容器较前两代减小,导管床两侧的磁体可以倾斜,利于病人的进入,并增加了X射线机的旋转角度、降低了噪声。但由于该系统响应速度较慢,很快被第四代MSS系统(图1)代替。第四代Nibo产品于2003年通过了美国FDA(Food and Drug Administration)认证,目前在多家医院进行临床试验。2010年底,Magnetecs公司推出了自己的磁导航系统(catheter guidance, control and imaging system),初步动物实验表明其效果良好。2006年,中国科学院电工研究所成功研制出了我国首台磁导航外科手术系统,测验表明各项指标均很好地满足要求。

1.1 磁导航技术在心血管介入中的应用

2003年,磁导航心脏介入系统首次应用于临床,作

图1 (网络版彩色)磁导航技术相关设备^[6]。(a) 磁导航系统操作平台;(b) 介入导管

Figure 1 (Color online) Magnetic navigation related equipment. (a) Operation platform of magnetic navigation system; (b) interventional catheter

为心血管领域的一种实用技术获得了快速发展。2004年,Ernst等人^[7]报道了使用磁导航系统对房室结折返性心动过速射频消融的案例,在后期的随访中未见明显并发症,证明了磁导航射频消融的安全性。同年,他又报道了1例磁导航下的左上腔静脉的慢径消融,表明该技术对复杂解剖结构的消融具有优势^[8]。2006年,Pappone等人^[9]报道了磁导航系统和三维电解剖标测系统对心房颤动的消融治疗。在40例患者中,导管成功地完成了38例患者的消融,前12例患者的消融时间明显长于后28名患者,平均消融时间约49.5 min。与常规消融手术相比,磁导航消融手术在时间上并没有明显优势,但却展现出了较短的学习曲线。次年,Aryana等人^[10]运用磁导航及三维标测系统对瘢痕相关室性心动过速的标测与消融进行了分析。77例患者中75例完成消融,磁导航引导下的基质检测标准可靠,能很好地识别低电压区和瘢痕区,透视时间短,随访2~12个月无室性心动过速复发。冠心病是常见的心血管疾病,冠状动脉的扭曲及狭窄给介入治疗带来巨大的挑战。2008年,Atmakuri等人^[11]对59例冠心病患者进行了磁引导下的冠状动脉介入操作,导管成功地通过85%的狭窄。值得注意的是,在常规介入失败的13例患者的二次介入中,有9例患者取得了成功,磁导航介入治疗的成功率达到84%,而常规介入治疗失败后的二次介入成功率为69%。2014年,Sandhu等人^[12]对梅奥诊所133例患者冠状动脉介入进行了回顾性分析,得到与Atmakuri等人^[11]相同的结论,即磁导航系统对冠状动脉介入具有很高的成功率,并在复杂病变的治疗中具有优势。随后的临床应用证实,该技术缩短了射线暴露时间,降低了术后并发症,具有更高的消融成功率^[13~15]。

1.2 磁导航技术在消化道中的应用

肠内营养是危重患者的重要营养支持方法,危重

患者意识丧失,咽喉部气管插管等因素给鼻空肠营养管的置入带来巨大的困难.2015年,西安交通大学严小鹏等人^[16]在软质导管的前端安装永磁体,在体外磁场的引导下成功地完成了鼻空肠营养置管术.赵欣等人^[17]进一步实施了磁导航技术床旁引导鼻空肠营养管的研究.他们对西安交通大学附属医院神经外科190例重症患者进行了鼻空肠营养管置入的对照研究,实验组采用磁导航技术置入鼻空肠营养管,对照组采用盲插法导入.实验组插管成功率97.93%,对照组插管成功率83.83%.实验组的置管时间为 (14.23 ± 1.76) min,体征恢复时间为 (14.93 ± 1.65) min;对照组的置管时间为 (36.21 ± 3.65) min,体征恢复时间为 (25.43 ± 2.09) min.结果表明,磁导航空肠营养管的置入时间、体征恢复时间、术后并发症均低于对照组,置管成功率及安全性更高,患者满意度显著高于对照组.

磁控胶囊内镜很好地解决了胶囊内镜无法自主移动的优点.2009年,Given Imaging公司在第一代Pillcam胶囊内镜中安装永磁体,通过体外磁场实现对其的主动控制,在随后的食管、胃内测试中,磁控胶囊内镜均表现出更高的可控性,但对于胃底、贲门的观察效果不理想^[18,19].日本的Olympus和德国的Siemens公司于2010年共同研发出特制的磁控胶囊内镜,其外形具有MRI的特征,采用外部动态梯度磁场控制胶囊内镜的三维移动. Keller等人^[19]使用该系统对24名患者及29名志愿者进行常规胃镜与磁控胶囊内镜检查的对照研究,磁控胶囊的检查时间约30 min,对胃底、贲门的观察率较低,两者具有一致的病理发现率.意大利比萨大学的Carpi和Pappone^[20]与圣安娜大学的Dario研究组^[21,22]设计的磁控胶囊内镜在长轴上增加了两个半圆形磁壳,摄像装置位于胶囊的两端.这种设计能够使其在外加磁场中均匀地径向磁化,有利于对胶囊内镜的精确控制,同时也满足了视觉要求.顾元婷等人^[23]对磁控胶囊内镜的研究最为广泛、深入,他们与Ankon公司联合研

制磁控胶囊内镜,将体外控制磁体安装在C型臂中,通过C型臂的多纬度旋转来控制体内胶囊内镜,经临床验证其精确度高、可操作性良好,并于2013年获得国家食品药品监督管理局(China Food and Drug Administration, CFDA)认证.为了测试磁控胶囊内镜的应用效果,他们对2017年6~11月海军军医大学附属长海医院的227例患者进行了磁控胶囊内镜与常规胶囊内镜检查效果的比较,将各段消化道的转运时间、检查时间、检查成功率作为评价指标.结果表明,磁控胶囊内镜具有更高小肠检查成功率,其胃内转运时间、幽门通过时间及总的检查时间明显短于对照组,能够大大缩短检查时间^[24]. Son等人^[25]和Hoang等人^[26]在磁控胶囊内镜内安装一种可以用于组织活检和注射的针头,改变了胶囊内镜无法内镜下操作的观念.近年来,Marco等人^[27]与Mahoney和Abbott^[28]通过对磁控胶囊内镜的位置反馈闭环控制的研究,以期实现对胶囊内镜的更精确控制.

1.3 磁导航技术在呼吸道中的应用

纤维支气管镜检查插管痛苦,无法到达细小支气管,经皮穿刺活检创伤大、成功率低,电磁导航支气管镜(electromagnetic navigation bronchoscope, ENB)可应用于肺外周病变的诊断中.通过对患者胸部CT图像的收集,经计算机软件三维重构支气管路径,在导航过程中标记导航靶部位与导管尖端的位置,在计算机软件的控制下即可实现对外周支气管检查与治疗(图2).

2005年, Hautmann等人^[30]对16例肺外周病变的患者进行了电磁导航支气管镜的活检的临床测试,所有16例患者均完成了支气管镜下的活检操作.其中,孤立性结节5例,3例导航探头可到达病变,组织病理为肺癌,2例只能到达病变周围,活检病理为正常肺组织.肺肿块3例,导航均可到达,组织活检均为肺癌.其余8例为浸润性肺癌,导航均可到达.该实验证明,支气管导航

图2 (网络版彩色)磁导航支气管镜的工作示意图^[29]. (a) 支气管三维重建影像; (b) 肺外周肿瘤及导航路径; (c) 支气管内导航实景
Figure 2 (Color online) Working diagram of magnetic navigation bronchoscope^[29]. (a) A three-dimensional reconstruction image of bronchus; (b) peripheral lung tumor and navigation path; (c) real view of endobronchial navigation

对于肺外周肿块是一种准确、可靠的检查手段。2007年, Eberhardt等人^[31]对磁导航肺外周病变活检与常规支气管镜外周活检的准确率进行了比较, 结果表明, 磁导航活检的准确率高于支气管活检(36/40 vs 22/40, $P=0.035$)。进一步的研究发现, 磁导航活检联合支气管镜活检、外周型支气管活检超声定位可显著提高活检的准确率。磁导航支气管镜有助于周围性肺癌的立体定向的放疗标记, 研究显示, 磁导航基准标记准确性更高^[32]。与CT或X射线辅助下的定位标记相比较, 磁导航支气管镜标记的方法表现出更低的并发症^[33]。2014年, Gex等人^[34]进行了一项回顾性分析, 以评价磁导航支气管镜的诊断价值与安全性。结果表明, 磁导航支气管镜的诊断准确率为73.9%, 对肺癌的敏感度为71.3%, 术后气胸的发生率为3.1%。最近发表的一项前瞻性多中心试验评估报告, 包括75个临床中心的2500个受试者^[35], 在1157个平均大小20 mm的肺部病变的诊断中获得了73%的诊断率^[36]。病灶大小和阳性支气管征被认为是提高诊断的因素^[37,38], 磁导航支气管镜治疗周围病变的并发症包括气胸和轻度到中度出血^[37]。这与传统的支气管镜检查相似。

1.4 磁导航技术在神经外科的应用

磁导航系统应用于神经外科手术中, 可实现颅内肿瘤的定位, 减少手术创伤。1989年, Howard等人^[39]建立了第一个用于大脑内立体定向导航的多线圈电磁系统。该系统具有6个正交的磁铁线圈, 可产生足够强度的磁场, 驱动磁性导管在血管内移动。该系统还具备一个立体定向导航界面, 在磁共振的实时透视监测下, 体外磁场控制一个安装永磁体的导管顺利到达脑血管病变位置。磁导航神经外科系统于1991年产生, 目前该系统已应用于神经外科的各个领域, 包括颅内肿瘤切除术、无框活检、神经内窥镜及经蝶手术。Atsumi等人^[40]开发了一种神经内窥镜, 在软质导管的前端安装传感器跟踪系统, 可实现对导管的实时监控。Barszcz等人^[41]在34名2周~17岁的儿童中使用磁导航进行了38次手术, 以评估电磁导航系统的定位精度。术前用CT或MRI建立患者头部三维模型以进一步分析, 其中完成24例行神经内窥镜手术, 10例开颅手术, 4例行分流或引流手术。磁导航技术不需要牢固地固定头部, 定位准

确率高, 可应用于儿童的神经外科手术中。2001年, 彭玉平等人^[42]利用该技术对12例颅内肿瘤患者实施了手术治疗, 12例患者均完成了手术, 术后影像学检查证实, 其中肿瘤全切除8例, 次全切除3例, 大部分切除1例, 导航精度(1.9 ± 0.9) mm, 取得了良好的效果。

2 讨论

磁导航技术主要是利用磁体之间的不接触力实现对响应装置的远距离操控。在人体狭小的腔道内, 常规器械通常无法进入, 磁导航技术像一只“无形的手”能够对体内响应装置的位置、方向做出实时调节, 有效地解决了操作的空间位阻难题。磁导航技术以生理管腔作为导航路径, 在微创化的条件下增加了操作的可控性。对于心、脑血管的介入而言, 磁导航技术无光线信号阻挡的局限性, 无手术盲区, 可以任意传递手术器械, 而不影响导管的推进。其远距离操作的特点, 大大减少了操作者的射线暴露量。磁导航技术对于介入导管尖端的良好控制, 增加了操作的成功概率, 减少了副损伤, 尤其是在一些复杂病变的导管置入中优势更加明显, 大量的临床研究证实其是一种安全、可靠的介入手段。磁控胶囊内镜在体外磁场的驱动下顺利通过消化道的生理狭窄, 能够在消化道内进行翻转、跳跃及停留等操作。这种主动控制的检查方式, 不仅节省了检查时间, 同时也使其对可疑病变的定位摄像成为可能。磁导航支气管镜的使用, 提高了肺外周病变的诊断率, 其精确的立体定位和药物投放功能减少了手术创伤和化疗药物的副反应。尽管如此, 磁导航技术在应用过程中暴露出了许多缺点。首先, 磁导航技术有一定的适用范围, 部分患者由于体内心脏起搏器及金属器械的置入, 体外磁场可能对其造成不良影响; 对于消化道、呼吸道狭窄的患者, 由于缺乏有效的导入路径而无法完成导航操作。其次, 磁导航技术对于响应装置的控制精度有待进一步提高, 外加磁场的非线性结构不能精确地控制胶囊内镜的角度和位置, 在检查过程中存在一些视觉盲区; 胃肠道的不规则蠕动, 也会影响磁控胶囊内镜的观察而增加漏诊概率。再次, 导航空间的狭小必然限制响应装置的体积, 在一定程度上限制了响应装置的功能, 这就要求我们对响应装置不断优化设计来满足临床要求。

参考文献

- 1 Gillies G T, Ritter R C, Broaddus W C, et al. Magnetic manipulation instrumentation for medical physics research. *Rev Sci Instrum*, 1994, 65: 533–

- 2 Tillander H. Magnetic guidance of a catheter with articulated steel tip. *Acta Radiol*, 1951, 35: 62–64
- 3 Tillander H. Selective angiography of the abdominal aorta with a guided catheter. *Acta Radiol*, 1956, 45: 21–26
- 4 Yodh S B, Pierce N T, Weggel R J, et al. A new magnet system for ‘intravascular navigation’. *Med Biol Eng*, 1968, 6: 143–147
- 5 Ram W, Meyer H. Heart catheterization in a neonate by interacting magnetic fields: A new and simple method of catheter guidance. *Cathet Cardiovasc Diagn*, 1991, 22: 317–319
- 6 Da Costa A, Guichard J B, Roméyer-Bouchard C, et al. Robotic magnetic navigation for ablation of human arrhythmias. *Med Devices*, 2016, 9: 331–339
- 7 Ernst S, Ouyang F, Linder C, et al. Initial experience with remote catheter ablation using a novel magnetic navigation system. *Circulation*, 2004, 109: 1472–1475
- 8 Ernst S, Ouyang F, Linder C, et al. Modulation of the slow pathway in the presence of a persistent left superior caval vein using the novel magnetic navigation system niobe. *Europace*, 2004, 6: 10–14
- 9 Pappone C, Vicedomini G, Manguso F, et al. Robotic magnetic navigation for atrial fibrillation ablation. *J Am Coll Cardiol*, 2006, 47: 1390–1400
- 10 Aryana A, d’Avila A, Heist E K, et al. Remote magnetic navigation to guide endocardial and epicardial catheter mapping of scar-related ventricular tachycardia. *Circulation*, 2007, 115: 1191–1200
- 11 Atmakuri S R, Lev E I, Alviar C, et al. Initial experience with a magnetic navigation system for percutaneous coronary intervention in complex coronary artery lesions. *J Am Coll Cardiol*, 2006, 47: 515–521
- 12 Sandhu G S, Sanon S, Holmes D R, et al. Magnetic navigation facilitates percutaneous coronary intervention for complex lesions. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2014, 84: 600–667
- 13 Shauer A, De Vries L J, Akca F, et al. Clinical research: Remote magnetic navigation vs. manually controlled catheter ablation of right ventricular outflow tract arrhythmias: A retrospective study. *Europace*, 2018, 20: ii28–ii32
- 14 Liu X Y, Jacobsen P K, Pehrson S, et al. Catheter ablation of incisional atrial tachycardia using remote magnetic navigation in patients after heart surgery: Comparison between acquired and congenital heart disease. *Europace*, 2018, 20: ii33–ii39
- 15 Qian P, De Silva K, Kumar S, et al. Early and long-term outcomes after manual and remote magnetic navigation-guided catheter ablation for ventricular tachycardia. *Europace*, 2018, 20: ii11–ii21
- 16 Yan X P, Liu W Y, Ma J, et al. The design of magnetic jejunum nutrition tube based on magnetic navigation techniques (in Chinese). *Mod Instrum Med*, 2015, 23: 1–3 [严小鹏, 刘雯雁, 马佳, 等. 基于磁导航技术的磁性空肠营养管设计. *现代仪器与医疗*, 2015, 23: 1–3]
- 17 Zhao X, Wei Y, Yu Y Y, et al. Application of the positioning with electromagnetic navigation system in the indwelling of bedside jejunal nutrient tube (in Chinese). *Chin Med Equip*, 2018, 15: 36–39 [赵欣, 魏园, 于媛媛, 等. 电磁导航系统引导定位在床旁空肠营养管留置中的应用研究. *中国医学装备*, 2018, 15: 36–39]
- 18 Swain P, Toor A, Volke F, et al. Remote magnetic manipulation of a wireless capsule endoscope in the esophagus and stomach of humans. *Gastrointest Endosc*, 2010, 71: 1290–1293
- 19 Keller J, Fibbe C, Volke F, et al. Inspection of the human stomach using remote-controlled capsule endoscopy: A feasibility study in healthy volunteers. *Gastrointest Endosc*, 2011, 73: 22–28
- 20 Carpi F, Pappone C. Magnetic maneuvering of endoscopic capsules by means of a robotic navigation system. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56: 1482–1490
- 21 Weismüller K, Bauer M, Hofer S, et al. A magnetic internal mechanism for precise orientation of the camera in wireless endoluminal applications. *Endoscopy*, 2012, 42: 481–486
- 22 Njossu C N, Assi C, Nigue L, et al. Robotic versus manual control in magnetic steering of an endoscopic capsule. *Endoscopy*, 2010, 42: 148–152
- 23 Gu Y T, Liao Z, Li Z S. Research and application progress of magnetic controlled capsule endoscopy (in Chinese). *Chin J Dig Endosc*, 2017, 34: 143–145 [顾元婷, 廖专, 李兆申. 磁控胶囊内镜研究和应用进展. *中华消化内镜杂志*, 2017, 34: 143–145]
- 24 Luo Y Y, Pan J, Chen Y Z, et al. Magnetic steering of capsule endoscopy improves small bowel capsule endoscopy completion rate. *Dig Dis Sci*, 2019, 64: 1908–1915
- 25 Son D, Gilbert H, Sitti M. Magnetically actuated soft capsule endoscope for fine-needle biopsy. *Soft Robot*, 2020, 7: 10–21
- 26 Hoang M C, Le V H, Kim J, et al. A wireless tattooing capsule endoscope using external electromagnetic actuation and chemical reaction pressure. *PLoS One*, 2019, 14: e0219740
- 27 Marco S, Gastone C, Gioia L, et al. A discrete-time localization method for capsule endoscopy based on on-board magnetic sensing. *Meas Sci Technol*, 2012, 23: 10
- 28 Mahoney A W, Abbott J J. Five-degree-of-freedom manipulation of an untethered magnetic device in fluid using a single permanent magnet with application in stomach capsule endoscopy. *Ind Robot*, 2016, 35: 129–147
- 29 Ashraf S F, Lau K K W. Navigation bronchoscopy: A new tool for pulmonary infections. *Med Mycol*, 2019, 57: S287–S293

- 30 Hautmann H, Schneider A, Pinkau T, et al. Electromagnetic catheter navigation during bronchoscopy. *Chest*, 2005, 128: 382–387
- 31 Eberhardt R, Anantham D, Herth F, et al. Electromagnetic navigation diagnostic bronchoscopy in peripheral lung lesions. *Chest*, 2007, 131: 1800–1805
- 32 Anantham D, Feller-Kopman D, Shanmugham L N, et al. Electromagnetic navigation bronchoscopy-guided fiducial placement for robotic stereotactic radiosurgery of lung tumors. *Chest*, 2007, 132: 930–935
- 33 Kupelian P A, Forbes A, Willoughby T R, et al. Implantation and stability of metallic fiducials within pulmonary lesions. *Int J Radiat Oncol*, 2007, 69: 777–785
- 34 Gex G, Pralong J A, Combescure C, et al. Diagnostic yield and safety of electromagnetic navigation bronchoscopy for lung nodules: A systematic review and meta-analysis. *Respiration*, 2014, 87: 165–176
- 35 Folch E E, Bowling M R, Gildea T R, et al. Design of a prospective, multicenter, global, cohort study of electromagnetic navigation bronchoscopy. *BMC Pulm Med*, 2016, 16: 60
- 36 Folch E E, Pritchett M A, Nead M A, et al. Electromagnetic navigation bronchoscopy for peripheral pulmonary lesions: One-year results of the prospective, multicenter navigate study. *J Thoracic Oncol*, 2019, 14: 445–458
- 37 Seijo L M, de Torres J P, Lozano M D, et al. Diagnostic yield of electromagnetic navigation bronchoscopy is highly dependent on the presence of a bronchus sign on CT imaging. *Chest*, 2010, 138: 1316–1321
- 38 Bowling M R, Kohan M W, Walker P, et al. The effect of general anesthesia versus intravenous sedation on diagnostic yield and success in electromagnetic navigation bronchoscopy. *J Bronchol Intervent Pulmonol*, 2015, 22: 5–13
- 39 Howard M A, Grady M S, Ritter R C, et al. Magnetic movement of a brain thermoceptor. *Neurosurgery*, 1989, 24: 444–448
- 40 Atsumi H, Matsumae M, Hirayama A, et al. Newly developed electromagnetic tracked flexible neuroendoscope. *Neurol Med-Chir*, 2011, 51: 611–616
- 41 Barszcz S, Roszkowski M, Daszkiewicz P, et al. Accuracy of intraoperative registration during electromagnetic neuronavigation in intracranial procedures performed in children. *Neurol Neurochir*, 2007, 41: 122–127
- 42 Peng Y P, Qi S T, Zheng G, et al. Application of electromagnetic navigation in surgical treatment of intracranial tumors: Analysis of 12 cases (in Chinese). *J First Mil Med Univ*, 2002, 22: 662, 672 [彭玉平, 漆松涛, 郑刚, 等. 电磁导航应用于颅内肿瘤手术12例临床分析. 南方医科大学学报, 2002, 22: 662, 672]

Summary for “磁导航技术的发展与临床应用”

Development and clinical application of magnetic navigation technology

Yun Lu^{*} & Shujian Yang

Department of Gastroenterology, the Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao 266000, China

^{*} Corresponding author, E-mail: cloudylucn@126.com

As the industrialization level has been continuously developed since the 21st century, the magnetic navigation system has been under constant human transformation. At the same time, due to the cross integration of computer-aided technology (CAT), imaging technology and other disciplines, the magnetic navigation technology has been applied in a wider range. As a result, the technology has been proven to have huge advantages currently in the navigation of heart and cerebral vessels, the digestive tract, and the respiratory tract. Here is more detailed information on the magnetic navigation technology: The magnetic navigation system for surgery serves as the operating platform of the technology, and the result of optimized and integrated multidisciplinary technologies. Let's trace back to the inception of concept of the magnetic navigation system: The concept of the magnetic navigation system was first put forward in 1984. From then on, the magnetic navigation system has gone through four generations. In this update period, the system has realized more comprehensive functions. As a result, compared with the traditional operation, the magnetic navigation technology serves as a more effective solution to steric hindrance in operations that conventional interventions fail to deliver. The advantages of this technology lie in small injuries, easy operation and remarkable treatment effect. Apart from the aforementioned content, according to the multicenter clinical application research in recent years, the magnetic navigation system has been proven to have the following advantages: First of all, vascular interventions in the context of magnetic navigation are more likely to lead to successful results and show more advantages in dealing with complicated pathological changes; what's more, magnetically-controlled capsule endoscopy (MCE) significantly reduces testing time, and it has also been further applied to test indications; and last but not least, magnetic navigation bronchoscope leads to better diagnosis rates and plays an important role in the positioning of peripheral pulmonary pathological changes and the relevant drug delivery. In spite of the aforementioned huge advantages, the magnetic navigation technology is still limited in many aspects. For instance, first of all, the application of the magnetic navigation technology can cause some indications that may have bad effects on metal implants; apart from this, the typical gradient magnetic field makes the magnetic navigation system unable to have more accurate control over the response unit, and MCE is yet to be applied to treatment as conventional endoscopes due to the dead zones in its observation. Due to the aforementioned reasons, the research on the technology at present is focused on the control mode, design of the response unit, and wider applications. To give more specific examples here: In recent years, the closed-loop control mode and the implantation of the needle-like structure of capsule endoscopy, and other new technologies have been developed, aiming to realize more accurate control over the response unit and more endoscopic operations. Based on the above content, the present paper provides a literature review of the clinical applications of the magnetic navigation technology based on its previous development history.

magnetic navigation technology, magnetically guided capsule endoscopy, electromagnetic navigation bronchoscope, neurosurgery

doi: [10.1360/TB-2019-0889](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0889)