

关键概念

- * 增强现实技术通过与手术相关的虚拟信息增强神经外科医生对手术区域的感知。
- * 它代表了一种先进的图像引导形式，集成到物理世界的手术场景中，使外科医生能够可视化隐藏的解剖结构。
- * 这项技术有助于根据患者的需求和解剖结构进行手术，并有助于避免并发症。
- * 它还允许对系统的准确性和可靠性进行连续监测。

介绍

增强现实是指通过合成、计算机生成和虚拟性质的信息来增强或扩展物理世界环境。因此，它与完全人工的虚拟现实不同。通过有意义地丰富用户对世界的感知，这种可视化模式可以帮助克服执行任务时遇到的限制。1-3这种潜力的被认识，使得近年来对增强现实技术在神经外科手术中应用的兴趣日益增加。4在神经外科手术中，增强现实有可能提供比传统神经导航更直观的手术图像引导。其基本原理是利用真实世界作为参考地图，并关联和传递信息以提高感知和理解。

神经导航功能通过坐标变换，将术前影像研究的三维（3D）虚拟空间与患者解剖结构的物理空间相结合，从而大大有助于术中定位和识别相关解剖结构。尽管是神经外科最实用的工具之一，传统的神经导航存在显著的缺点，即基于点操作，依赖于神经导航探针的使用。该设备传达的空间信息被转换到神经导航站屏幕上的二维（2D）平面上——经典地，横断面、矢状面和冠状面，辅以与导航探头轴线正交的“在线”平面。因此，外科医生需要(1)将注意力从手术区域转移开，以便(2)在心理上将手术视野与神经导航屏幕上分散的信息整合起来。而增强现实神经导航则无需上述步骤，通过将成像研究中的选定虚拟信息直接空间整合到手术视野中，大大有助于后者（见图30.1）。此外，这还允许

评估虚拟模型和物理世界注册的准确性。

正是当代技术的进步使得无框立体定位（即神经导航）在20世纪80年代中期和90年代出现，这不仅对基于框架的立体定位的局限性做出了回应，而且提供了此后成为标准的全新应用。因此，就像今天一样，增强现实不仅解决了特定的神经导航限制，而且有可能改变未来神经外科手术的方式。

先决条件

基于增强现实的系统需要满足三个要求：(1)如前所述，虚拟模型需要生成并与物理环境融合；(2)虚拟模型需要在三维空间中与物理环境对齐；(3)根据用户视角计算并实时显示虚拟模型的投影。2,3在神经外科领域，第二点指的是将放射影像的空间注册到患者的解剖结构。这通常使用神经导航站完成。为此，需要一个附着在患者身上的参考阵列来计算从物理环境到图像数据集虚拟空间的空间坐标。通过专用工具从这些图像数据集中分割出感兴趣的结构以获得虚拟模型。软件因为这些模型是在与成像研究相同的虚拟3D空间中创建的，所以这些模型本身也与患者进行了配准。

为了增强这些模型的操作，实际观察手术区域的方法也需要注册到患者的三维空间中。值得注意的是，在实时手术视频流上显示数字信息的过程实际上是图像合并，而不是增强现实。在图像合并系统中，外科医生通过数字设备与物理世界断开连接。因此，外科医生面临系统延迟的风险，甚至可能看到与正在进行的手术无关的数字内容。出于安全考虑，外科医生始终需要物理上观察手术区域。因此，用于显示叠加图像的光学设备需要注册和跟踪。例如，在图30.1中，操作显微镜配备了自身的参考星以及校准的光学装置。这样，显微镜就可以在空间中被跟踪。由于显微镜连接到神经导航站，因此可以从外科医生的角度看到虚拟模型的计算投影，并将其注入显微镜的目镜中。图30.1中的血管模型的形状和大小会根据显微镜的视图轨迹、焦点位置和放大程度实时重新计算，满足第3点。

当前系统的概述

增强渲染的应用模式存在显著差异。尽管如此，所有这些方法都是尝试简化影像数据与手术区域的融合，尽管并非所有设置都遵循之前所述的增强现实的三个定义点。



图30.1. 在手术铺巾前，通过导航显微镜观察左侧额颞区的增强视图，患者处于准备夹闭左侧大脑中动脉（MCA）动脉瘤的位置。左耳尖位于左上角；患者的左眼位于右上角。增强现实技术使外科医生能够“穿透”患者，直观地看到患者的左侧颈内动脉及其分支，包括MCA动脉瘤。动脉瘤的颈部以绿色标出。

在没有专用硬件的情况下，可以通过使用个人电脑和免费软件将患者的头部和大脑皮层的数字照片上叠加3D磁共振成像（MRI）重建图像来获得增强图像。另一份报告则在手术中使用投影仪，将MRI切片投射到患者头部。然而，这种设置面临的问题是，2D图像叠加在弯曲的三维头部表面时会产生固有的图像失真，此外还有视差误差。8使用半透明镜片在颅内手术期间叠加自动立体3D图像，9以及轴向2D计算机断层扫描（CT）10和MRI切片以指导脊柱经皮针操作，11-17也已被描述。

不得不借助额外材料进行增强现实导航的困境，激发了将神经外科手术室中已有的硬件整合的兴趣；此外，手术显微镜光学装置的精确校准似乎天生适合这一角色。1982年，凯利及其同事的开创性工作展示了计算机与手术显微镜连接成像数据的潜力。18,19四年后，罗伯茨及其团队通过开发一种与CT图像数据耦合的显微镜，实现了无框架立体定位——或神经导航——的概念，该显微镜通过头皮标记注册实时跟踪其空间位置和焦平面，允许将图像注入显微镜的目镜中。20然而，注入的分割结构模型仅限于轮廓或填充平面。

为了充分利用3D注册的潜力，爱德华兹·金及其同事开发了一种名为MAGI（显微镜辅助引导干预）的系统，该系统通过立体3D渲染模型叠加增强了增强视觉体验。他们解决了虚拟模型深度感知及其在手术视野中流畅整合的关键问题。他们认识到，为了使该系统的优势超越标准神经导航，其高精度的可重复性是必不可少的，这不仅通过自动显微镜校准实现，还为此植入了骨锚定标记以进行注册。

成像技术和配准算法的进步使得目前市面上的神经导航系统不仅能够通过皮肤标记点对点配准达到临床可接受的精度，而且还能采用更近期且简便的激光表面配准方法。26-28使用类似的显微镜设置，

我们团队29-33和其他团队34-38致力于研究术中增强现实引导在神经外科手术中的实用性。这些系统的优点不仅在于扩展了手术视野，更重要的是，它们改善了外科医生对手术视野的观察，无需将视线转向单独的屏幕获取信息，从而优化了手术流程。图30.1、30.2A、30.4、30.8A、30.8C、30.8E、30.9、30.10B、30.11、30.12A、30.13-30.15、30.16B和30.16C均展示了通过手术显微镜看到的增强手术视野。

尽管我们团队在铺巾前使用显微镜增强叠加以确定切口方向（见图30.1、30.4A-B、30.8A和30.13A），但也有观点认为显微镜过于笨重，不适合此目的。因此，开发了提供实时增强3D渲染并依赖更轻硬件的系统。这些系统使用了跟踪的手持或头戴式摄像头，经过校准并注册到神经导航站。39-41然而，这些设备将增强图像显示在单独的屏幕上，要求外科医生视线远离手术区域。摄像头的视角不一定与外科医生的视角一致，需要额外的心理调整来适应这两个场景；此外，当摄像头与外科医生的视线轨迹不一致时，增强深度目标模型的表面投影可能会被推断到皮肤上的一个点，而这个点并不在外科医生的视野范围内。40

据报道，手持便携式平板电脑的后置摄像头视频流增强功能也已实现，42这一功能如同显微镜一样，能够扩大用户视野中的手术区域。在手术铺巾前阶段，这一功能直观便捷，但在铺巾后则失去了优势。确实，虽然可以想象以无菌方式为平板电脑铺巾，但操作过程中需要手持平板电脑，或由助手持握，这显然不太理想。

同样，头戴式显示器也被探索为显微镜的不那么笨重的替代品，43-48特别是对于通常不使用显微镜的手术。这些系统仍处于开发阶段，尚未达到真正的临床应用，主要是因为校准此类设备以适应个体用户的视觉参数存在固有的难度。关于准确性的问题，特别是对于深部病理的不确定性，也是当前的一个限制。旧一代头戴设备的相对笨重，以及增强视图无法与手术团队其他成员“共享”，可以视为其实际应用的额外障碍。然而，这两个问题的解决方案是可以想象的。此外，最近有报道称，已商业化的眼镜式显示器在手术视野的一个角落提供了神经导航或透视屏幕的插图，用于脑室腹腔分流术中的导管插入49和脊柱内固定术。50,51尽管这些系统并不能真正增强手术视野，但它们在视野中提供了有助于提高手术理解的信息。因此，手眼协调和手术人体工程学得到改善，因为外科医生不需要反复地将视线移向神经导航屏幕。

内窥镜是进入深层神经外科区域的成熟视野通道，与显微镜一样，具有精确调校的光学装置，可以集成增强现实技术。然而，与显微镜不同的是，内窥镜在这方面似乎较少受到关注。最近有报道称，一种系统能够在自立体显示上提供令人印象深刻的三维神经导航重建，用于经蝶入路，但这些信息仍然在单独的屏幕上呈现。2002年，川又及其同事发表了他们使用内窥镜增强现实导航系统的临床经验，该系统提供实时、患者注册的

3D渲染的解剖分割显示在内窥镜屏幕上。此外，该系统还校正了虚拟叠加到内窥镜视图的镜头畸变效果。尽管这是一个开创性的装置，但其增强渲染并未真正融入手术视野，3D虚拟模型仅以单视图形式在2D屏幕上呈现。随着3D屏幕的出现，结合适当视觉提示应用于计算机图形，可以显著帮助解决这一问题。

当前应用程序

随着神经外科手术中需要考虑的术前和围手术期信息量的增加，神经外科的范式正逐渐向根据患者个体需求定制化、标准化的方法转变。32将这些数据转化为手术环境中的应用方法，有助于改善手术的人机工程学，并提高实现给定病例手术目标的可能性。因此，增强现实技术有潜力将当前技术条件下可以虚拟建模的数据有意义地整合到外科领域。然而，对于每个个案都必须进行充分的预想，以预测(1)哪些信息可能在手术中及手术的哪个阶段有用（以免使手术视野过载）；以及(2)以何种形式增强这些信息，使其最有效地发挥作用。

颅骨切开术规划中的增强现实

皮肤切口和开颅手术（图30.2）可以根据患者个体解剖结构进行定制，通过预见潜在的关键结构。目标是创建一个针对个体术中需求的靶向手术通道，同时避免不必要的组织暴露和破坏。这一点在Cutolo的图中有所说明。

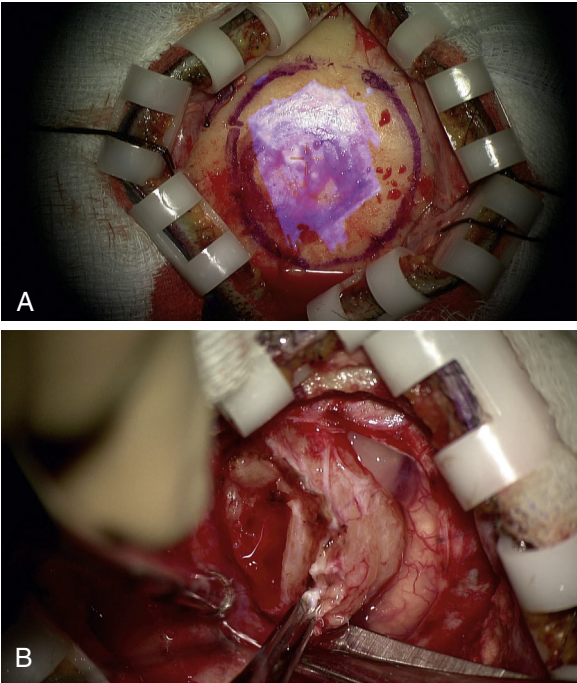


图30.2.使用增强现实技术进行皮肤切口和开颅手术计划。(A)增强显微镜视图，显示紫色模型的小凸起脑膜瘤的位置。(B)这个简单的例子说明了皮肤切口和开颅术可以完美地定制为“不多也不少”，以满足手术目的。

以及同事在基于人体模型的任务中，使用和不使用增强现实技术访问靠近语言区的轴内病变。46我们团队报告了自引入增强现实技术以来，在逐步缩小的开颅手术（图30.3）和颅外-颅内（EC-IC）旁路手术中的经验。32,33此外，事先可视化潜在解剖结构有助于通过预先了解来避免并发症，例如静脉窦的位置（图30.4B和C）、皮质引流静脉或颅内静脉窦和气室的位置。

神经肿瘤手术中的增强现实

轴内病变（视频30.2）

皮肤切口和开颅手术的计划可以以分段肿瘤模型为中心（图30.5），并且可以在手术早期阶段可视化关键血管或有活力的解剖结构的位置。由于能够在暴露前可靠地预测这些结构，因此可以将其地整合到手术方法中。

白质束模型可以进一步扩大手术视野（图30.6）。然而，扩散张量成像纤维追踪算法的差异可能导致同一纤维路径的不同重建结果。54,55使用导航经颅磁刺激（nTMS）进行皮层映射，在与直接电皮层刺激相比时显示出高度准确性，且基于nTMS的纤维束在脑肿瘤患者中比功能性MRI更可靠。因此，nTMS的应用改善了手术和临床结果。56-59使用这些数据增强手术视野有助于以人体工程学的方式理解其与肿瘤的关系。然而，由于这些数据基于术前扫描，容易受到脑移位的影响。为了解决这一众所周知的问题，我们不仅需要根据注入的纤维束图像（即，增强现实图像引导），我们沿着注入的图像操作吸盘60或切除工具61、62，每种工具都用作连续皮下定位装置（图30.7）。通过这种方式，我们在术中结合了增强解剖和功能信息，并利用后者来监测和补偿前者中的位移。值得一提的是，术中MRI可以通过自动重新注册手术区域来更新神经导航系统，从而补偿脑部位移。用户干预则可以将这些新获得的数据整合到增强现实引导中。

颅底手术

神经导航在涉及颅底的手术中被公认为是无价的工具。63-68 3D成像数据

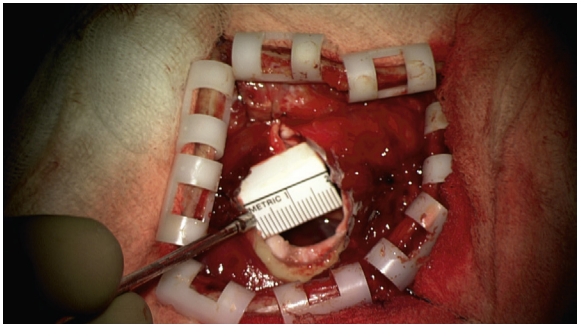


图30.3.使用增强现实引导进行的微型翼点开颅术，用于夹闭未破裂的右侧大脑中动脉分叉处动脉瘤。

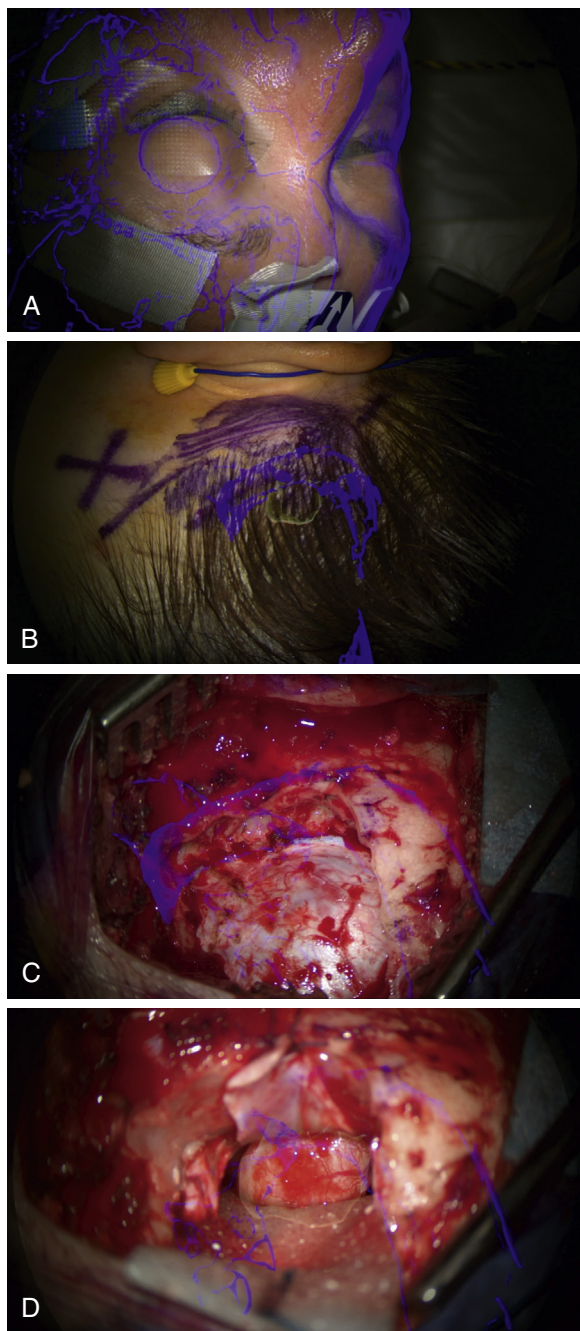


图30.4.在接受左侧后穹窿入路切除前庭神经鞘瘤的患者中增强显微镜视野。(A)首先,通过患者虚拟头像与实际头部的重叠来评估神经导航的准确性。一旦虚拟数据被确认为可靠,就可以用于手术规划和导航。(B)左侧横窦和乙状窦的虚拟模型(蓝色)显示了它们在颅骨下的路径。肿瘤模型呈黄色。(C)后穹窿开颅切口与虚拟静脉窦轮廓齐平钻孔。(D)硬脑膜切开后,肿瘤完全暴露,并与其虚拟模型完美对齐。请注意,虚拟模型完成了仍隐藏的神经鞘瘤后部。

不同的模式,如MRI、CT和血管造影,可以融合以增强神经外科医生对病理过程与颅底复杂的骨、血管和神经解剖学之间的关系理解。此外,在这些手术过程中,神经导航受脑移位的影响较小。^{69,70}然而,定期中断手术流程,将剃刀探针引入可能深埋的手术区域,同时视线移向神经导航屏幕,不仅繁琐,还可能存在危险。因此,增强现实技术最早报道的一些临床应用涉及颅底也就不足为奇了。^{23,24}增强的“透视”覆盖层提供了隐藏的关键结构的整体视图,如迷路或颈动脉管(图30.8)。当前系统增强渲染中的视觉提示提供了深度感,特别是在钻骨或再次手术时尤为有用。³¹此外,它有助于选择最适合患者需求的手术路径,正如金、爱德华兹及其同事在一位接受岩尖囊肿切除术的患者中所描述的那样,该手术需要采用不寻常的方法以保护听力。^{23,24}

经蝶入路的狭窄手术通道不易容纳神经导航探针等额外器械,因此将神经导航信息整合到手术视野中的理由更为充分。增强现实辅助显微镜^{34,70-72}和内窥镜⁵³在经蝶手术中均有报道(图30.9),但其报道数量少于经颅手术。这可能是由于对较旧神经导航系统在经蝶入路中的准确性存在不信任,以及认为在非复杂病例中可能不需要神经导航。⁷¹⁻⁷⁵未经优化的增强渲染⁷⁰和硬件笨重⁷²也可能减少了对此临床应用的兴趣。过去十年间,患者配准和神经导航精度的进步以及增强视觉体验的改善解决了这些担忧,但这些问题仍然是研究的主题。^{76,77}根据目前的文献,增强现实被认为有助于视觉上增强潜在风险的邻近结构,如颈动脉、视神经和视交叉,以及勾画肿瘤。据报道,在重新手术过程中,当中线结构缺失导致解剖定位困难时,或在大肿瘤的情况下,增强现实特别相关。

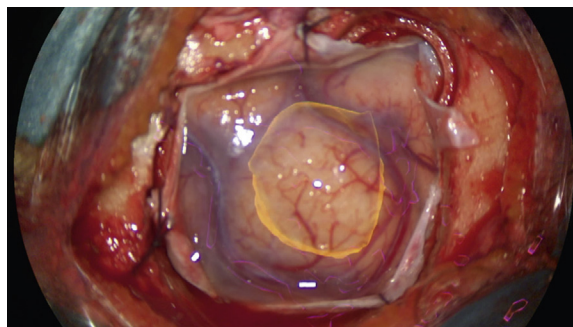


图30.5.增强显微镜视野揭示了轴内肿瘤的皮质下位置。皮肤切口和开颅手术根据显微镜目镜中注射的肿瘤图像(橙色显示)进行调整。这里还展示了如何使用增强叠加来监控系统的准确性:可以看到物理皮质血管的独特路径和形状与虚拟分割(浅粉色)相对应。由于虚拟和物理血管之间存在一致性,可以认为虚拟分割的肿瘤可靠地指示了物理肿瘤的位置。这种虚拟与物理血管重叠的概念被称为“特征血管识别”。

侵袭性病变。34,53,71,72 Thomale及其同事进一步指出，其在对靠近颈动脉的侧位垂体微腺瘤进行手术时具有实用性。71 其他团队则倾向于在术中并排显示共配准的虚拟和真实神经导航内窥镜图像。尽管这些系统并非增强现实的真实应用，但它们可能同样能够向外科医生传达必要的三维信息，而不会显著影响手术的人体工程学。

脑血管手术中的增强现实

颅内动脉瘤的成功手术治疗取决于外科医生构建目标血管结构的三维模型并将其转换为

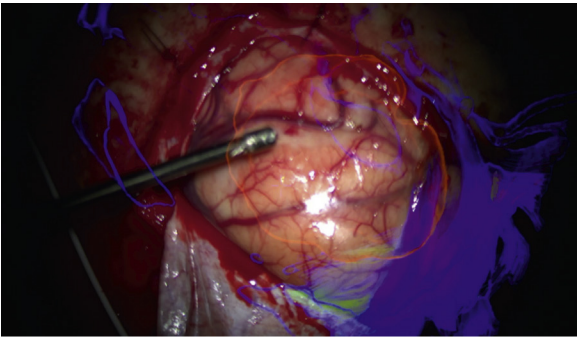


图30.6.以肿瘤分割（橙色）为中心的开颅术后的增强显微镜视图。病变位于右前额叶皮质深部，靠近皮质脊髓束（蓝色和绿色），它正在略微移位。在这里，显微镜的焦平面位于皮质表面之下较深的位置，因此可以看到皮质脊髓束围绕着肿瘤缠绕，这也是为什么大脑表面显得不那么清晰的原因。该图还展示了遮挡的视觉深度线索原则：请注意，肿瘤覆盖了皮质脊髓束较深的部分，从而传达出一种深度感，尽管如此，肿瘤仍然通过透明度调制保持可见。肿瘤增强的边界，称为边缘描绘，有助于感知这种局部遮挡。

外科领域。81各种出版物强调了这一心理任务的重要性，并提出了增强它的方法。患者特异性实体立体光刻82,83和3D打印可变形84-87动脉瘤模型已被用于术前规划和模拟。为此目的还描述了虚拟现实手术平台。88-94此外，Rohde及其同事假设，在手术过程中显示与手术视野匹配的相关3D血管造影信息，并允许外科医生在手术中旋转这种重建图像，可以积极影响手术结果。95这些报告都是一个共同努力的不同表述，其中增强手术视野可被视为下一步的发展方向。

除了对开颅手术的影响外，增强现实技术被认为通过针对蛛网膜下腔分离并允许在暴露前评估周围解剖结构（图30.10），从而减少手术创伤。一旦到达动脉瘤处，图像注入有助于选择夹子类型和放置位置，揭示动脉瘤颈部的隐藏部分（图30.11）。尽管所有这些观点在我们发表的增强动脉瘤夹闭术经验中都被认为是有帮助的，但我们认为增强现实技术平均影响了每六例手术中的一个，因为如果没有增强现实技术，手术可能会变得不合理地复杂。确实，增强现实技术对于解剖结构复杂或手术方法独特、技术难度高的患者来说具有特别的价值。我们以一位同时患有大脑中动脉分叉部和对侧后交通动脉瘤的患者为例进行了说明。后者通过两个视神经之间的角度夹闭，借助虚拟分割的动脉瘤颈部进行引导。文献中越来越多地关注如何最大限度地利用单侧入路，以减少患者的后续开颅手术，增强现实技术在这方面显得尤为有用。

血管结构通常复杂且相互缠绕（图30.12C）动静脉畸形（AVM）可能限制增强现实技术的应用，因为实际分割有用的解剖结构以实现术中引导存在困难。30这种情况尤其适用于动脉供血血管（图30.12A和B），而引流静脉则更容易定义。Kersten-Oertel及其同事提出了一种解决方案

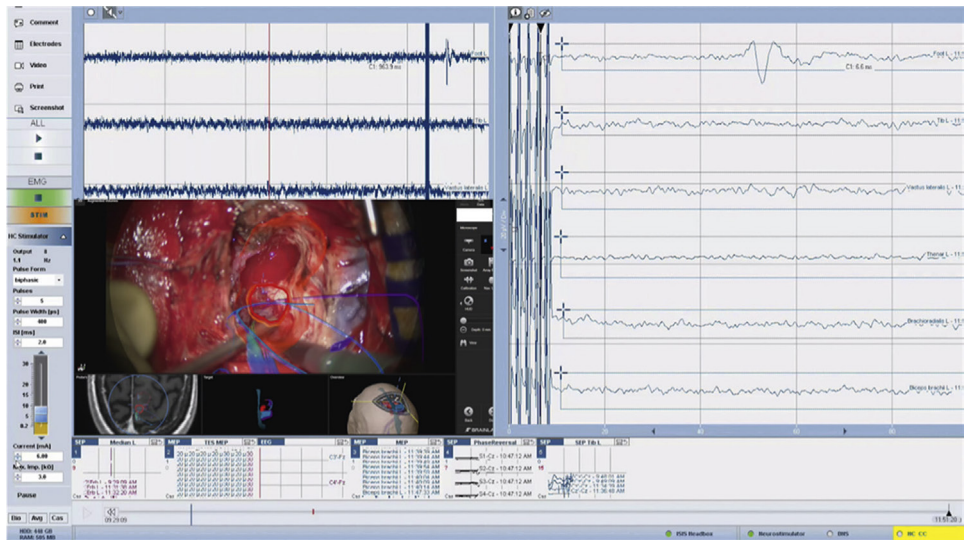


图30.7.术中神经生理监测画面，左下角显示了外科医生的增强显微镜视野，在切除右侧额叶肿瘤时。肿瘤分割呈橙色。切口深度中的红橙色轮廓代表显微镜焦平面上的肿瘤轮廓。紫色线条是皮质脊髓束的轮廓，蓝色线条是显微镜焦平面上的皮质脊髓束轮廓。屏幕其余部分显示神经监测曲线，特别是运动诱发电位的曲线。

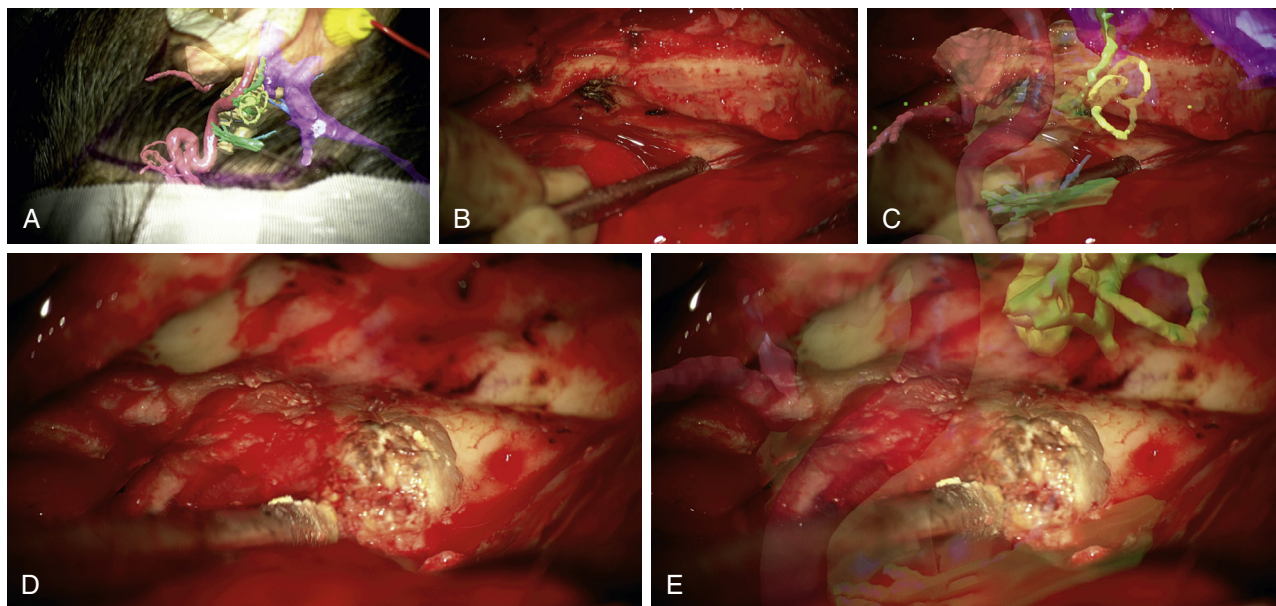


图30.8.在接受中窝入路治疗右侧岩骨肉瘤的患者中增强显微镜视野。(A)右上角可见耳后螺旋电极。右侧颈内动脉和中脑膜动脉呈红色；前庭半规管的特征形状呈黄色；面神经呈绿色，靠近前庭；颅神经VII和VIII以浅蓝色表示，位于前庭后方；右侧横窦和乙状窦呈紫色；三叉神经也呈绿色；展神经以浅蓝色表示，靠近三叉神经；肿瘤是黄色的大块状物。(A)的视角与(B)至(E)相同。(B和C)通过中窝入路观察颅底，未使用(B)，但对(A)中详细描述的结构进行了(C)图像注射。(D和E)通过内颈动脉与前庭之间的狭窄角度钻入岩骨顶端至肿瘤(D)，由增强现实引导(E)。

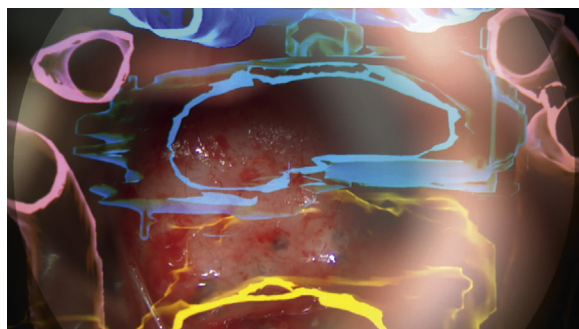


图30.9.经蝶窦入路增强显微镜视野，位于患者接受颅底脊索瘤切除术时的蝶窦内。双侧颈内动脉的虚拟模型以红色显示。视神经和视交叉位于上方，以蓝色显示。垂体及其柄部以浅蓝色显示。颅底脊索瘤以黄色显示。术中定位通过了解中线以及颅底脊索瘤的上缘而得到增强。

通过在供血血管上应用简单的定位标记来告知外科医生这些血管的位置，而不是创建完整的解剖结构——这往往令人困惑。41将动静脉畸形的血流动力学信息整合到增强叠加图像中，也可能误导引流血管的识别，因为这些结构由于动静脉分流而过早充盈。41尽管这些点可能被视为增强现实技术在动静脉畸形手术中应用的障碍，但实际上它们只是表明每个个案都需要考虑哪些信息需要增强以达到手术目的（视频30.3）。

我们小组最近报告了一个破裂的基底神经节AVM的示例。105发现唯一的供血血管是纹状动脉。

并且发现该动脉的一个妊娠期假性动脉瘤是破裂点。由于血管迂曲，两次经动脉栓塞尝试均未成功，因此选择了经静脉途径。然而，这种方法需要术中动脉控制，因为如果栓塞剂未能到达假性动脉瘤而仅封闭了病灶，则存在再次破裂的风险。由于已经证明经血管经动脉途径不可行，这种动脉控制通过手术实现，并借助增强现实技术，使得供血血管的识别更加明确。随后，在假性动脉瘤近端暂时夹闭了供血血管，成功栓塞后取出了夹子。

在术前影像学研究中，通过精确定位接管点来增强手术视野，同样可以用于引导硬脑膜动静脉瘘的断开。41我们还展示了这些标记（如图30.13A所示的切口前增强显微镜视图中的例子）如何允许针对性解剖和精确术中识别术前选定的血管段，用于EC-IC旁路手术。这避免了对最终证明不适合吻合的皮质血管进行不必要的解剖。此外，由于直径仅在2.2至3.3厘米之间，颅骨切开术的大小也得以最小化，在我们发表的颞浅动脉至大脑中动脉吻合系列中。33尽管间接旁路在脑血管重建中的作用可能被推崇，以支持大颅骨切开术，106,107但应注意到，颅骨切开术通常是为了增加找到合适供血血管的可能性，而不是为了特别针对缺血区域。108这一点应与小颅骨切开术在此患者群体中的优势相权衡。33最后，我们发现增强现实技术在

在下一部分关于增强脊柱手术中，展示了脊柱硬膜动静脉瘘的相同原理。

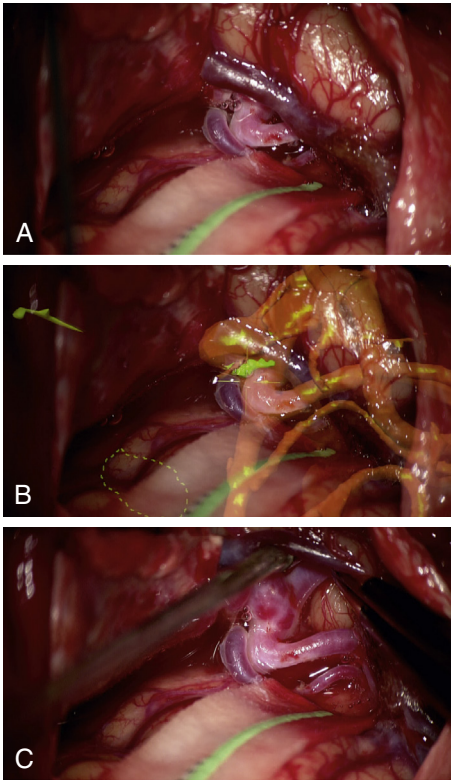


图30.10. 使用增强现实技术在动脉瘤夹闭过程中定位蛛网膜下腔剥离。(A)通过显微镜观察未破裂的中脑动脉(MCA)分叉动脉瘤患者的右侧翼点入路。(B)同一视角,结合虚拟MCA显示,揭示了动脉瘤的确切位置,从而引导剥离(C)。借助增强现实技术,A中可见的动脉环可以明确识别为上M2分支,这体现了“特征血管识别”的概念(另见图30.5和30.16)。

加速颅外供体血管的安全分离,这些血管通常采用曲折的路径(图30.13)。

文献中关于用于海绵状血管瘤手术的增强现实技术的报道与已经描述的轴内肿瘤切除术的范例相似^{36,40}。

脊柱手术中的增强现实

与用于颅骨手术的增强现实系统相比,目前脊柱手术中的增强现实应用仍主要局限于实验室阶段的可行性报告。这主要是由于在临床应用中,将可移动脊柱与导航设备精确注册以达到足够的手术精度存在众所周知的困难。此外,确定最有效的增强特征可视化媒介仍是另一个障碍。事实上,脊柱手术涵盖了广泛的宏观和微观手术程序、技术和方法,因此单个增强现实系统不太可能满足所有这些需求。甚至可以设想,在同一手术的不同阶段会使用多个系统。

一些团队将增强现实技术从颅骨手术扩展到了脊柱手术(图30.14;视频30.4)。使用Brainlab颅骨导航系统,一份技术报告展示了如何通过显微镜图像注入术前绘制的截骨平面,指导了一例先天性楔形半椎体患者T12椎弓根减压截骨术。参考阵列固定在L1棘突上;由于存在T11-L1融合,整个T11-L1节段成功配准。



图30.11. 增强显微镜下左侧翼点入路夹闭后交通动脉瘤的视野。颈内动脉的分割显示为红色,动脉瘤(体部和颈部)为紫色,左侧视神经为黄色。虚拟动脉瘤揭示了动脉瘤颈部的隐藏部分,增强了术中对颈部形态的理解,有助于夹子的选择和定位。请注意,虚拟分割无缝地完成了颈内动脉可见部分的近端(眼段和海绵体段)和远端(分为A1和M1段)。还应注意,位置较浅的虚拟视神经部分遮挡了虚拟颈内动脉,传达了一种深度感。

术前CT是通过解剖标志配点匹配实现的。¹⁰⁹在通过右侧C1椎板切除术切除后牙突神经母细胞瘤的过程中,我们的小组也使用了类似的Brainlab颅骨导航。假设在C0-C1水平上运动最小,使用基于显微镜的增强现实引导来确定椎动脉、肿瘤和髓质的精确定位,但仅在术中确认了配准精度后。¹¹⁰

在他们最近关于10名接受增强现实辅助手术治疗脊髓外或脊髓内病变的患者以及另外10名患有脊髓内肿瘤的报告¹⁰⁹中,Carl及其同事还使用了显微镜图像注入虚拟模型,这些模型是用Brainlab软件分割的。为了进行配准,对俯卧位患者的术中低剂量CT进行了扫描,参考星可以固定在棘突上、贴在皮肤上,或者在涉及上颈椎的情况下,固定在头架上,正如我们小组之前描述的情况一样。然而,虚拟模型的分割是在术前仰卧位获取的影像学研究基础上进行的;这些影像数据通过专用软件以非线性模式与术中CT融合,但仍需要用户干预来验证每个椎体的融合结果。^{35,111}

虽然所有这些报告都与脊柱显微手术有关,但显微镜仍然是脊柱内固定术中不切实际的工具,需要寻找更适合的增强现实实施方式。此外,减少术中辐射的可能性进一步推动了在器械辅助脊柱手术中使用该技术的趋势。

安倍及其同事使用了一种商用头戴式显示器与跟踪摄像头结合的增强现实技术,用于骨质疏松性椎体骨折的经皮椎体成形术。他们指出,在将该系统应用于经皮椎弓根螺钉置入之前,需要开发一种更稳健的配准方法。¹¹²类似的警告也在最近的一份尸体实验室病例报告中得到呼应,该报告测试了一种依赖手动配准的商用增强头戴式显示系统,结果导致严重的螺钉错位。¹¹³

近年来,已报道了各种增强现实设置,用于脊柱模型和尸体的经椎弓根器械引导。¹¹⁴⁻¹¹⁶令人鼓舞的临床结果已

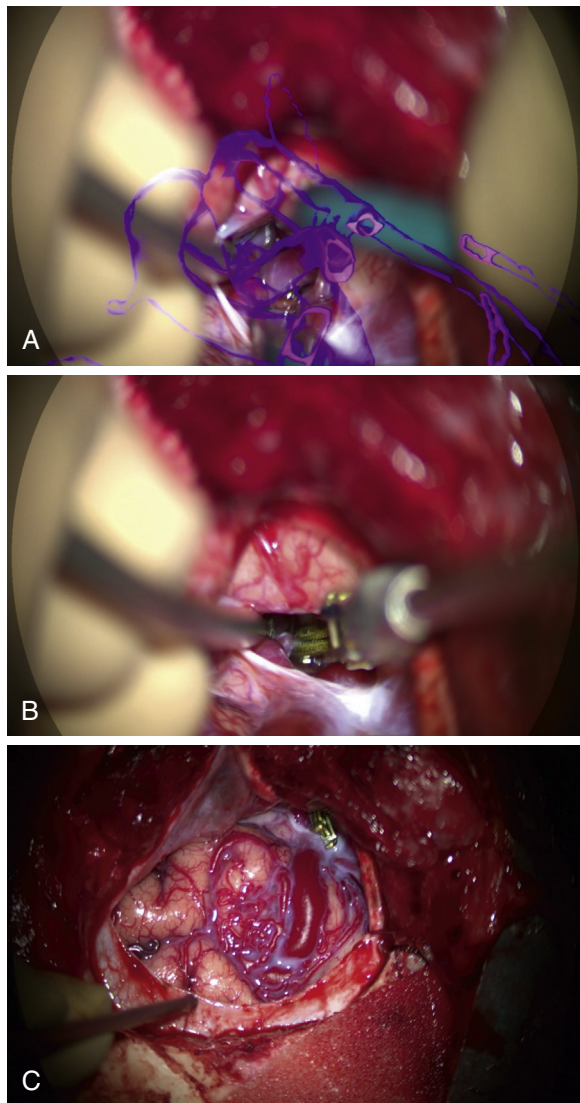


图30.12. 右侧外侧裂动静脉畸形 (AVM) 的显微镜视野, 由大脑中动脉的一个分支供血并流入横窦。由于该动静脉畸形仅由一个分支供血而非多个分支, 因此虚拟供血血管分割得以实现。(A) 虚拟分割供血血管以减少解剖范围为目标。血管的特征形状确认了所遇到的动脉是供血血管 (签名血管概念)。(B) 剪切供血血管。(C) 缩小放大显示病灶和突出的引流静脉, 在继续切除病灶和切断引流静脉之前 (未显示)。在这个非放大视图中, 可以明显看出动静脉畸形的复杂性可能阻碍其虚拟分割。对于重要的手术血管, 使用虚拟精确定位标记是一种更为冷静的选择 (如图30.13A中的两个小绿圈所示, 以及图30.14B中的浅蓝色点所示)。14B), 从而向外科医生指示其在手术区域的位置, 并允许外科医生在解剖过程中定位它们。然而, 该技术阻止外科医生利用血管的特征形状 (特征血管概念) 进行明确的术中识别。

来自埃尔米-特兰德及其同事关于使用吊顶安装的、具有二维和三维功能的电动C形臂进行胸腰椎螺钉置入的报告, 该系统通过集成在C形臂平板探测器中的四个摄像头显示增强的手术视野视频。117-119有趣的是, 这是由飞利浦医疗开发的系统,

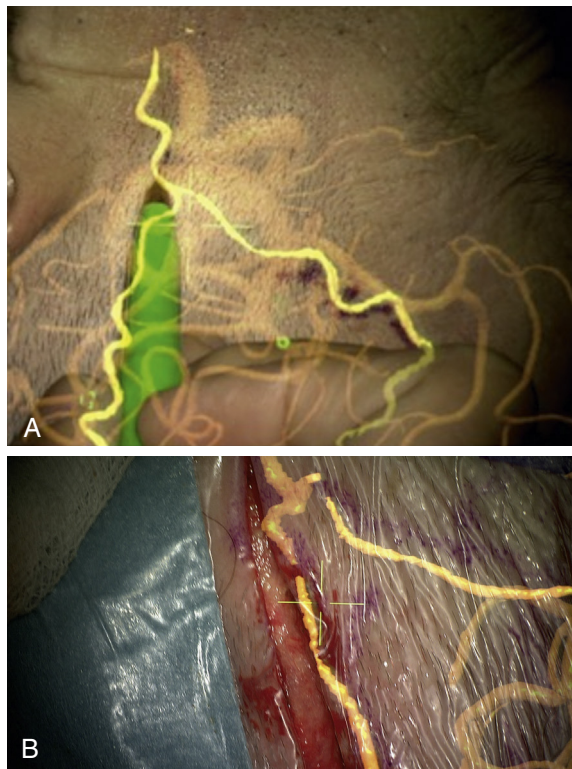


图30.13. 外颅外增强现实的使用

颅内旁路手术。(A) 手术铺巾前, 使用增强显微镜观察左侧额颞区。左眼位于图像右上角, 耳朵位于左上角。虚拟颈内动脉的分支以红色显示, 浅表颞动脉 (STA) 的额支和顶支模型以黄色显示。术前选择的颅内受体血管用两个小绿圈 (精确定位标记) 标记。注意透明度调节以及虚拟STA和大脑中动脉重叠如何传达深度感。(B) 在另一名患者中, 通过增强现实引导对STA分支进行解剖。

通过生成一个连接各个标记相对位置的网格模型, 使用专用皮肤标记进行患者跟踪和运动补偿。C型臂可以在一次采集中生成多个椎骨的图像, 并且骨分割和患者配准都是自动化的。

当前限制和未来的发展：外科领域的注册和跟踪

准确地将影像数据与手术区域的物理解剖结构注册是前提条件, 否则增强现实不仅无法实现, 还可能带来危险。作为神经外科医生, 我们对这些系统的要求是最高级别的可靠性, 同时对术前或术中用户干预以达到这一目的几乎没有耐心。尽管从我们的临床角度来看, 这些期望似乎是合理的, 但它们对系统开发者设定了很高的标准。我们从传统的神经导航中了解到, 配准精度取决于大量的物理、技术、操作和生物因素。28,55当手术观察设备的校准误差——用于生成增强现实——进一步加入这一链时, 潜在的误差来源会更多。120

Gildenberg和Labuz评论了他们对神经导航设备普遍使用不足的观察, 121

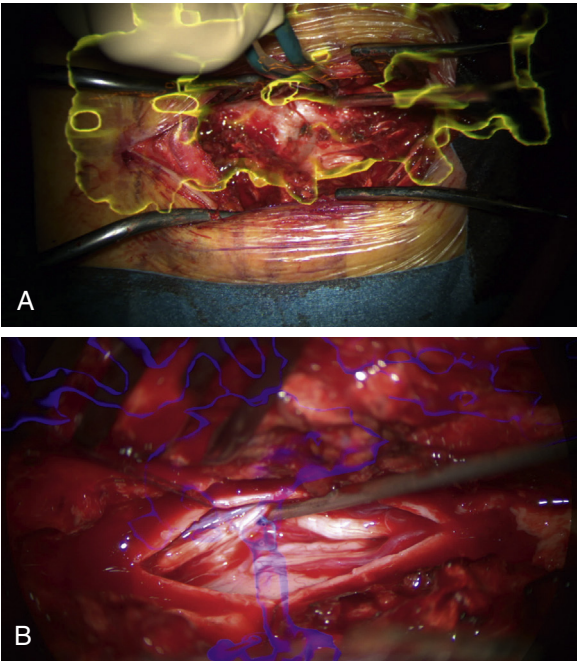


图30.14. 增强现实技术在脊柱硬膜动静脉瘘手术中的应用。(A)增强显微镜下,采用后正中胸椎入路暴露T9右侧椎板,患者正在进行T9脊柱硬膜动静脉瘘的断开手术。T9椎体及其相邻椎体的分割显示为黄色。(B)同一视角,在右侧T9椎板切除术和硬膜切开后。脊柱硬膜动静脉瘘(深蓝色)及其瘘口点(浅蓝色点)的分割有助于术中病理的理解和精确定位。因此,可以有针对性地进行解剖,避免不必要的神经结构移位。

将此解读为成像数据以二维形式呈现及其与手术领域的缺乏整合所致。他们因此强调了神经导航尚未开发的潜力。然而,我们还建议对系统持一定程度的不信任,作为其先前使用不足的进一步动机。目前,表面匹配技术的注册精度报告为1.8毫米用于前部定位的病灶,2.8毫米用于非前部病灶;皮肤标记点为2到5毫米;植入骨锚定标记点约为1毫米,被认为是“金标准”。尽管这些估计值是卓越的成就,但它们只是平均值,标准偏差各不相同(骨锚定标记点的标准偏差最低),这代表了个体注册结果的变异性。正是这种变异性需要在未来关注,以提高导航系统的可靠性,如果我们确实打算向增强型术中3D导航过渡的话。

等待这些进展,术中CT35、122和MRI 123、124的自动注册已被报道为减少注册误差的方法,但存在延长手术时间的缺点。此外,这两种模式都可以在手术过程中通过新的图像获取来更新神经导航。值得注意的是,超声作为一种耗时较少的患者注册和更新导航手段,正逐渐引起关注。125-127然而,如果图像数据集通过任何方式在术中更新,用于增强的虚拟模型也需要重新分割——这几乎是在手术过程中无法完成的任务。为了绕过耗时的完整图像重获取步骤,非变形和更有趣的是可变形配准

术中超声引导下术前MRI算法是目前研究的主题127-131。

将增强覆盖层应用于手术区域的一个实际后果是,它允许外科医生从手术开始时通过比较虚拟与现实之间的重叠,轻松评估神经导航的准确性。这可以在铺巾前通过叠加患者头部的虚拟分割来完成,其中面部和耳部特征(如耳廓和耳轮)尤为关注(图30.15;另见图30.4A)。切开后,可以使用可识别的骨性解剖结构(如缝线或骨性突起)作为第二次评估,最后,在硬脑膜开孔后,可以利用暴露的皮质结构的独特、特征形状作为第三次评估。29-31,33与脑沟分割相关的困难促使我们倾向于使用血管来实现这一目的。此外,从影像研究中分割血管相对容易,其尺寸与常规显微手术视野相当。我们将这一概念称为“特征血管识别”,可以评估神经导航的精度达到亚毫米级别(如图30.5、30.10、30.11和30.12A所示),更重要的是,可以利用它对虚拟模型进行刚性重定位(图30.16)。

使用皮质血管进行配准并不是一个新颖的概念。可以设想,通过手术显微镜集成的技术发展,能够通过用户干预识别血管,并在整个手术过程中自动跟踪,从而为术前影像数据的算法非刚性变形更新提供基础。已有几篇旨在此目的研究报告了令人鼓舞的结果。此外,如果这种智能导航系统被证明是可靠的,它将允许近乎实时地更新增强渲染。

将这些想法应用于脊柱手术,可以设想开发一种导航系统来追踪各椎骨后部骨骼形状,而无需像通常那样,在从一个椎骨到另一个椎骨进行器械操作时多次重新注册。然而,无论是通过肉眼(直接评估增强叠加与物理世界之间的不匹配)还是通过智能导航系统感知这些解剖形状,在经皮脊柱器械操作中都不明显不足。因此,这种手术中的弱注册过程和不满意的方法跟踪手术区域,带来了螺钉错位的风险。因此,新的注册和跟踪方法需要根据各自手术技术的具体特点发展。皮肤标记追踪是目前正在探索的一种经皮器械操作的发展方向,112,113超声波用于迭代术中重新注册可能代表另一种方法。138,139此外,正如本章前一节所述,脊柱手术中开发增强现实技术的一个动机是其减少术中辐射的潜力。因此,进一步创新脊柱手术中的增强现实系统的目标将是实现这一承诺,并需要探索尽可能避免辐射的重新注册方法。

增强渲染的可视化

未来的工作还需要专注于改善增强视觉体验。一方面,这将依赖于用户反馈来确定给定操作的最佳设置。另一方面,这将需要针对给定设置优化增强渲染。

增强现实辅助导航的另一个局限性——这次与用户而非系统本身直接相关——是注意力盲视，即注意力限制阻碍了对增强场景的认知处理，导致即使这些发现完全在用户的视野中，也会被忽略。事实上，在增强环境中，外科医生除了需要依赖真实线索外，还需依赖虚拟线索进行操作。因此，未来发展的挑战在于确保虚拟数据能够无缝融入手术现场。

为了实现全面的增强效果，虚拟图像必须与真实环境相融合，遵循视觉和认知深度线索。此外，虚拟图像不能覆盖物理解剖结构，还必须考虑虚拟到物理的颜色和阴影交互。如果物理环境过于明亮，虚拟图像会逐渐消失；而如果物理环境过于昏暗，虚拟图像又会占据主导地位。此外，虚拟和物理对象的焦点需要匹配，以便同时清晰地看到两者，如图30.6.3所示

深度感知由双眼和单眼深度线索共同介导。单眼深度线索多种多样。视差运动——远处物体看似移动得更慢——传达了距离的印象（动态深度线索），眼动焦点和眼睛汇聚（眼动深度线索）也是如此。两个物体的重叠、它们的相对大小、近处物体相对于远处物体细节和对比度的相对增加，以及线性透视和物体投射阴影的相互作用，都是进一步的成分（图像深度线索）。当这些线索在双眼中结合时，通过立体视觉传达出整体的三维视觉体验。遮挡——即两个物体在不同深度位置的重叠——是深度感知的强大媒介，没有它，虚拟物体看起来只是漂浮在视野前方。考虑到这一因素以增强手术视野似乎有些矛盾，因为增强现实的独特优势正是打破解剖学遮挡的限制，并为外科医生提供透视

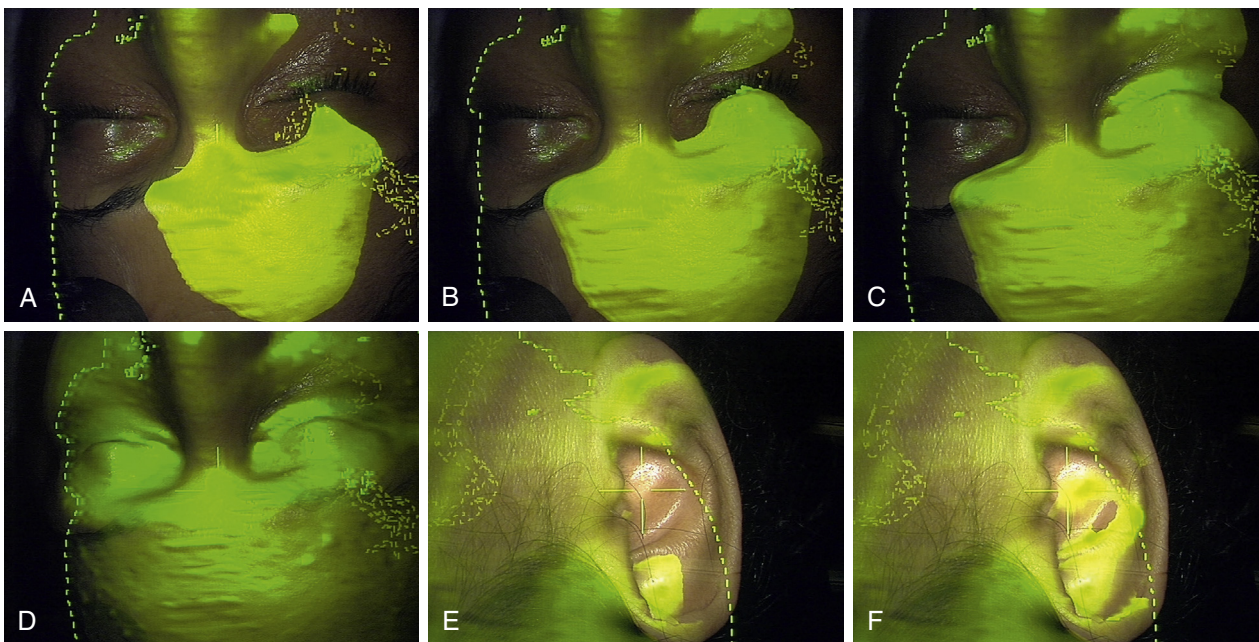


图30.15. 手术视野的扩大，用于评估神经导航的准确性。虚拟和真实头部的重叠（A-D）和通过显微镜观察到的耳（E和F）特征，允许从手术开始时就评估神经导航的准确性。

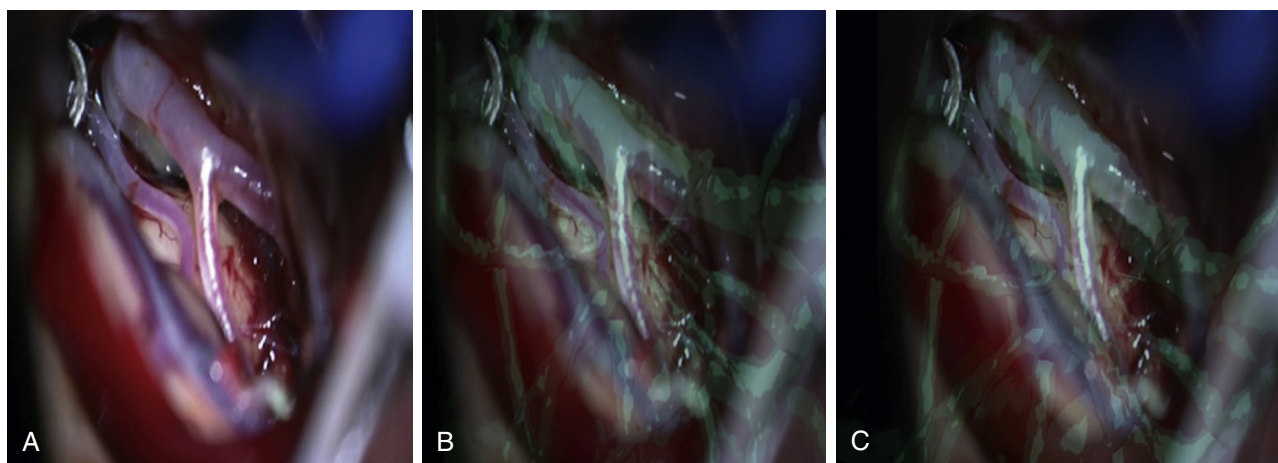


图30.16. 使用签名血管识别来筛查和校正神经导航系统的不准确性。(A)显微镜下带有分叉的血管视图。(B)同一视图中注入虚拟血管的图像，可以观察到不匹配的情况。(C)重新注册并校正不匹配后的同一视图。

能力。复杂的透明度渲染可以用于克服这一问题。图30.6、30.11和30.13是这一方法的示例。然而，不充分的透明度调制也可能导致视觉信息过载，如图30.8所示。^{2,142}

看到增强渲染中调节深度感知的多种方法，未来确定这些方法中哪些真正适用于完成特定神经外科任务至关重要。为了改善脑血管手术中的增强现实可视化，Kersten-Oertel及其同事的研究表明，最有效的视觉线索是色深（颜色对应深度的程度）、雾度（远处物体对比度相对降低）和边缘描绘（增强物体边界，有助于感知局部遮挡；见图30.6）。有趣的是，将立体视觉加入这些线索并未改善相对深度感知。有人提出，交互式动态深度线索可以进一步增强这些静态线索。

解决视觉线索相关问题的方法也将取决于增强渲染的显示方式，我们之前已经讨论过各种示例。3D自立体屏幕作为有前景的设备出现了。它们不需要专用的观看眼镜；生成的3D图像可以从宽角度观看，而且可以同时由多个观众观看。^{142,144}可以设想，这样的屏幕可以成为神经外科显微镜的显示器。确实，如果增强现实技术在神经外科应用中得到进一步发展，并且未来几年内对这项技术的兴趣不减，这可能会导致从手术显微镜到显微镜的可能范式转变。

除了前面讨论的硬件和软件限制之外，视觉增强的最佳形式也可能取决于任务。例如，虽然动脉瘤和动静脉畸形手术都可以使用增强显微镜装置进行，但对感兴趣的血管段进行全面解剖分割在动脉瘤中被发现是有用的，但在动静脉畸形中则较少系统地应用。确实，正如前一节所讨论的，精确定位动静脉畸形供血血管的位置可能比混淆整个血管段的分割更有用，无论这些软件达到何种水平。这个例子说明了相同的信息以不同形式呈现时会产生不同的结果。因此，不仅需要考虑到增强哪些信息以及依赖哪种装置，还需要考虑为当前的手术任务使用哪种增强渲染。

未来应用

未来应用将集中于在外科医生的视野中整合更多相关的和定制的解剖学和功能信息。这些信息显然会因手术而异，并且不会在整个神经外科范围内标准化。例如，脑灌注研究的数据可以整合到增强手术领域中，用于EC-IC旁路手术，以指导吻合口位置的选择。然而，手术增强并不局限于放射学信息。可以想象，非视觉信息也可以被视觉化增强。例如，可以在经椎弓根器械操作过程中整合图像引导和连续术中神经生理监测的系统，将外科医生的增强视野染成绿色、橙色或红色，实时显示所选经椎弓根路径的安全性，随着螺钉推进而变化。

增强也不一定需要视觉上的性质：使用吸力装置进行连续操作时听到的音调

皮质脊髓束的映射⁶⁰通过声学方式向外科医生传达神经生理学信息。用声学信息增强手术被称为“听觉外科”。¹²¹事实上，增强现实概念上可以应用于所有感官，而不仅仅是视觉。¹同样，在机器人神经外科手术刚刚兴起的背景下，触觉反馈可以增强外科医生在远程操作机器人时的感知。

结论

术中使用增强现实技术克服了传统神经导航的不足，通过将术前影像的三维信息转化为手术区域的三维空间。这增强了外科医生完成当前任务所需的理解能力。将神经导航数据直接整合到手术现场还改善了手术流程，避免了频繁停机查看神经导航站的需求。此外，它还提供了一种持续直观监控系统准确性和可靠性的手段，通过直接视觉评估虚拟分割与物理世界的重叠情况。

它在各种神经外科手术中都有应用，其“透视”能力可以预见相关的解剖特征。它可以在手术过程中避免并发症，例如，在后矢状入路时直接预览静脉窦的位置，或在额部开颅术中预览气窦的位置。此外，它还可以在病理检查时提供指导，如在颅底钻孔时围绕迷路，或在寻找动静脉畸形供血血管时进行靶向分离，或在夹闭器放置于动脉瘤颈部隐匿部分时提供指导。根据目前文献报道的使用情况，它特别适用于解剖结构复杂或采用非传统手术路径的病例。

然而，更广泛地说，神经外科中的增强现实具有更广泛、可能更重要的潜力：因为它允许根据个体患者的独特解剖结构和病理学定制标准化手术，因此在当前向更加个性化、微创手术的范式转变中具有重要意义。³²

建议阅读

- Cabrilo I, Bijlenga P, Schaller K. 脑动脉瘤手术中的增强现实技术：技术报告。神经外科，2014；10（增刊）2）：252-260；讨论260-251。
- Drouin S, Kochanowska A, Kersten-Oertel M, et al. IBIS: 一个用于图像引导神经外科手术的OR就绪开源平台。Int J Comput Assist Radiol Surg. 2017;12(3):363-378.
- Edwards PJ, King AP, Maurer Jr CR, 等人。显微镜辅助引导介入系统（MAGI）的设计与评价。IEEE Trans Med Imaging. 2000；19（11）：1082-1093。
- Elmi-Terander A, Burstrom G, Nachabe R, et al. 利用增强现实手术导航和术中3D成像进行椎弓根螺钉置入：首项人体前瞻性队列研究。Spine (Phila Pa 1976). 2019;44(7):517-525.
- Kawamata T, Iseki H, Shibasaki T, Hori T. 鼻内蝶手术治疗垂体肿瘤的内镜增强现实导航系统：技术说明。神经外科。2002；50（6）：1393-1397。
- Kockro RA, Tsai YT, Ng I, Dex-ray: 手持式视频探头增强现实神经外科导航。神经外科，2009；65(4):795-807；讨论807-798。
- Roberts DW, Strohbehn JW, Hatch JF, Murray W, Kettenberger H. 无框架立体定位计算机断层成像与手术显微镜的整合。《神经外科杂志》，1986；65(4)：545-549。
- Shuhaiber JH. 手术中的增强现实。Arch Surg. 2004；139(2)：170-174。

参考文献

1. Carmigniani J, Fuhrt B. 增强现实：概述。见：Fuhrt B 编. 增强现实手册。纽约，NY：Springer；2011：3-46。
2. Kalkofen D, Sandor C, White S, Schmalstieg D. 增强现实的可视化技术。见：Fuhrt B 编著。《增强现实手册》。纽约，NY：Springer；2011：65-98。
3. Azuma R. 增强现实调查。《存在：远程操作员和虚拟环境》。1997年；6(4)：355-385。
4. Shuhaiber JH. 手术中的增强现实。Arch Surg. 2004；139(2)：170-174。
5. Enchev Y. 神经导航：基因学、现实和前景。神经外科焦点，2009；27(3)：E11。
6. Lovo EE, Quintana JC, Puebla MC. 一种新颖，廉价的图像共配准方法，用于增强现实技术在影像引导手术中的应用。神经外科。2007；60(4增刊2)：366-371；讨论371-362。
7. Besharati Tabrizi L, Mahvash M. 增强现实引导神经外科手术：图像投影技术的准确性和术中应用。J Neurosurg. 2015；123(1)：206-211。
8. Ferrari V, Cutolo F. 致编辑的信：增强现实引导神经外科手术。J Neurosurg. 2016；125(1)：235-237。
9. Iseki H, Masutani Y, Iwahara M 等。体积描记（叠加三维图像引导导航）。增强现实技术在神经外科的临床应用。立体定向功能神经外科。1997；68(1-4 Pt 1)：18-24。
10. Fichtinger G, Deguet A, Masamune K, 等。CT扫描仪中针头插入的图像叠加引导。IEEE Trans Biomed Eng. 2005；52(8)：1415-1424。
11. Fischer GS, Dyer E, Csoma C, Deguet A, Fichtinger G. Mr 图像叠加和其他针头插入技术的验证系统。Stud Health Technol Inform. 2007；125：130-135。
12. Weiss CR, Marker DR, Fischer GS, Fichtinger G, Machado AJ, Carrino JA. 使用图像叠加增强现实可视化进行 Mr 引导干预：系统描述、可行性及脊柱模型中的初步评估。AJR Am J Roentgenol. 2011；196(3)：W305-W307。
13. U-Thainual P, Fritz J, Moonjaita C, et al. 图像叠加引导：临床前使用的系统评价。Int J Comput Assist Radiol Surg. 2013；8(3)：365-378。
14. Fritz J, U-Thainual P, Ungi T, 等。MRI 引导介入术中图像叠加增强现实可视化：1.5 T MRI 系统下腰椎手术的准确性。AJR Am J Roentgenol. 2012；198(3)：W266-W273。
15. Fritz J, U-Thainual P, Ungi T, 等。使用图像叠加系统进行增强现实可视化，用于 Mr 引导干预：人体尸体脊柱注射程序的技术性能。1.5 特斯拉，欧洲放射学杂志，2013；23(1)：235-245。
16. Fritz J, U-Thainual P, Ungi T, et al. 使用图像叠加技术进行增强现实可视化，用于 Mr 引导干预：1.5 T 下的尸体骨活检。Invest Radiol. 2013；48(6)：464-470。
17. Fritz J, U-Thainual P, Ungi T, et al. 使用增强现实图像叠加引导的医生引导椎成形术。Cardiovasc Intervent Radiol. 2014；37(6)：1589-1596。
18. Kelly PJ, Alker Jr GJ, Goerss S. 计算机辅助立体定向显微手术治疗颅内肿瘤。神经外科。1982；10(3)：324-331。
19. Kelly PJ, Kall B, Goerss S, Alker Jr GJ. 基于 CT 的立体定向开颅术和计算机监测的二氧化碳激光精确切除轴内 CNS 病变。Acta Neurochir (Wien). 1983；68(1-2)：1-9。
20. Roberts DW, Strohbehn JW, Hatch JF, Murray W, Kettenberger H. 无框架立体定位计算机断层成像与手术显微镜的整合。J Neurosurg. 1986；65(4)：545-549。
21. Edwards PJ, Hawkes DJ, Hill DL 等。使用手术显微镜进行耳鼻喉科和神经外科手术增强现实。J Image Guid Surg. 1995；1(3)：172-178。
22. Edwards PJ, King AP, Hawkes DJ, 等。手术显微镜中的立体增强现实。研究健康技术信息。1999；62：102-108。
23. King AP, Edwards PJ, Maurer Jr CR, et al. 显微镜辅助引导介入系统。Stereotact Funct Neurosurg. 1999；72(2-4)：107-111。
24. Edwards PJ, King AP, Maurer Jr CR, 等人。显微镜辅助引导介入系统 (MAGI) 的设计与评价。IEEE Trans Med Imaging. 2000；19(11)：1082-1093。
25. Maurer Jr CR, Fitzpatrick JM, Wang MY, Galloway Jr RL, Maciunas RJ, Allen GS. 使用植入式标记物对头部体积图像进行注册。IEEE Trans Med Imaging. 1997；16(4)：447-462。
26. Raabe A, Krishnan R, Wolff R, Hermann E, Zimmermann M, Seifert V. 颅内影像引导手术中患者登记的激光表面扫描。神经外科。2002；50(4)：797-801；讨论802-793。
27. Barnett GH, Miller DW, Weisenberger J. 脑活检手术中使用头皮应用的标记物进行无框架立体定位：218例经验。J Neurosurg. 1999；91(4)：569-576。
28. Stieglitz LH, Fichtner J, Andres R, 等。神经导航精度的隐性丧失：颅内神经外科中无框架立体定位系统不匹配影响因素的系统回顾分析。神经外科。2013；72(5)：796-807。
29. Cabrilo I, Bijlenga P, Schaller K. 脑动脉瘤手术中的增强现实技术：技术报告。神经外科。2014；10(增刊2)：252-260；讨论260-251。
30. Cabrilo I, Bijlenga P, Schaller K. 脑动静脉畸形手术中的增强现实技术：技术评估和考虑。Acta Neurochir (Wien). 2014；156(9)：1769-1774。
31. Cabrilo I, Sarrafzadeh A, Bijlenga P, Landis BN, Schaller K. 增强现实辅助颅底手术。神经外科。2014；60(6)：304-306。
32. Cabrilo I, Schaller K, Bijlenga P. 微型颅内神经瘤切除术能有多少？神经外科。2015；76(1)：E101-E102。
33. Cabrilo I, Schaller K, Bijlenga P. 增强现实辅助旁路手术：拥抱微创。World Neurosurg. 2015；83(4)：596-602。
34. Carl B, Bopp M, Voellger B, Sass B, Nimsky C. 经蝶窦手术中的增强现实。World Neurosurg. 2019。
35. Carl B, Bopp M, Sass B, Voellger B, Nimsky C. 脊柱手术中增强现实支持的实施。Eur spine J. 2019。
36. Stadie AT, Reisch R, Kockro RA, 等。采用微创方法进行脑海绵状血管瘤手术-解决技术相关局限性。Minim Invasive Neurosurg. 2009；52(1)：9-16。
37. Drouin S, Kochanowska A, Kersten-Oertel M, et al. IBIS：一个用于图像引导神经外科手术的 OR 就绪开源平台。Int J Comput Assist Radiol Surg. 2017；12(3)：363-378。
38. Mascitelli JR, Schlachter L, Chartrain AG, 等。颅内手术中导航链接式平视显示器：早期经验。Oper Neurosurg (Hagerstown). 2018；15(2)：184-193。
39. Inoue D, Cho B, Mori M, et al. 增强现实神经导航临床应用的初步研究。J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg. 2013；74(2)：71-76。
40. Kockro RA, Tsai YT, Ng I, Dex-ray：手持式视频探头增强现实神经外科导航。神经外科，2009；65(4)：795-807；讨论807-798。
41. Kersten-Oertel M, Gerard I, Drouin S, 等。神经血管手术中的增强现实：在手术室中的可行性和首次应用。Int J Comput Assist Radiol Surg. 2015；10(11)：1823-1836。
42. Deng W, Li F, Wang M, Song Z. 使用无线平板电脑实现易于使用的增强现实神经导航。Stereotact Funct Neurosurg. 2014；92(1)：17-24。
43. Birkfellner W, Figl M, Huber K, 等。用于医学中增强现实可视化的头戴式操作双目镜——设计和初步评价。IEEE Trans Med Imaging. 2002；21(8)：991-997。
44. Birkfellner W, Figl M, Matula C, et al. 头戴式双目手术镜中的计算机增强立体视觉。Phys Med Biol. 2003；48(3)：N49-N57。
45. Figl M, Ede C, Hummel J, et al. 一种具有可变变焦和聚焦的光学透视镜式手术显微镜的全自动校准方法。IEEE Trans Med Imaging. 2005；24(11)：1492-1499。
46. Cutolo F, Meola A, Carbone M, et al. 一种基于头戴式显示器的神经外科肿瘤学增强现实系统：对幻影的研究。Comput Assist Surg (Abingdon). 2017；22(1)：39-53。
47. Incekara F, Smits M, Dirven C, Vincent A. 可穿戴混合现实设备在神经外科中的临床可行性。World Neurosurg. 2018；118：e422-e427。
48. Maruyama K, Watanabe E, Kin T, 等。通过增强现实技术实现神经外科导航的智能眼镜。Oper Neurosurg (Hagerstown). 2018；15(5)：551-556。
49. Yoon JW, Chen RE, ReFaey K, 等人的图像引导顶枕脑室导管置入技术的可行性和安全性，借助可穿戴抬头显示器。Int J Med Robot. 2017；13(4)。

50. Yoon JW, Chen RE, Han PK, Si P, Freeman WD, Pirris SM. 脊柱内固定术中头戴式显示器的手术可行性和安全性. *Int J Med Robot.* 2017; 13(3).
51. Deib G, Johnson A, Unberath M, et al. 使用光学透视镜头戴式显示器进行图像引导下经皮脊柱手术:概念验证和原理. *J Neurointerv Surg.* 2018;10(12):1187-1191.
52. AmrAN, Conrad J, Kantelhardt S, GieseA. 自立体三维神经导航至Sella:技术说明. *World Neurosurg.* 2017; 105: 386-393.
53. Kawamata T, Iseki H, Shibasaki T, Hori T. 鼻内窥镜手术治疗垂体肿瘤的内镜增强现实导航系统:技术说明. *神经外科.* 2002; 50(6): 1393-1397.
54. Mori S, van Zijl PC. 纤维追踪:原理和策略-技术综述. *NMR Biomed.* 2002; 15(7-8): 468-480.
55. Wang MN, Song ZJ. 神经导航错误的分类与分析. *神经外科.* 2011; 68(4): 1131-1143; 讨论1143.
56. Krieg SM, Picht T, Sollmann N等. 术前基于nTMS的运动图谱辅助切除运动性语言转移灶,比较两组观察队列. *Front Oncol.* 2016; 6: 261.
57. Krieg SM, Sabih J, Bulubasova L,等. 通过导航经颅磁刺激术进行术前运动映射改善了运动性语言区病变的预后. *Neuro Oncol.* 2014;16(9):1274-1282.
58. Picht T, Schulz J, Vajkoczy P. 术前使用导航经颅磁刺激有助于早期切除运动皮层中疑似低级别胶质瘤. *Acta Neurochir (Wien)*. 2013; 155(10): 1813-1821.
59. Ille S, Sollmann N, Hauck T,等. 病变位置对术前语言映射的影响:功能性磁共振成像,导航经颅磁刺激和直接皮层刺激研究. *J Neurosurg.* 2015;123(2):314-324.
60. Raabe A, Beck J, Schucht P, Seidel K. 运动性脑肿瘤手术期间皮质脊髓束的连续动态映射:一种新方法的评价. *J Neurosurg.* 2014; 120(5): 1015-1024.
61. Boex C, Momjian S, Schaller K. 致编辑的信:电流在运动传导图谱中的应用. *J Neurosurg.* 2016; 124(6): 1881-1883.
62. Boex C, Goga C, Berard N,等. 为Soring超声波抽吸器引入新型连接夹,用于皮质下连续运动映射. 见:个人交流. 2020年.
63. 当然, U, Alberti O, Petermeyer M, Becker R, Bertalanffy H. 高级图像引导颅底手术. *Surg Neurol.* 2000; 53(6): 563-572; 讨论572.
64. Rohde V, Spangenberg P, Mayfrank L, Reinges M, Gilsbach JM, Coenen VA. 颅底肿瘤和血管病变中的高级神经导航. *Minim Invasive Neurosurg.* 2005; 48(1): 13-18.
65. Narayan V, Bir SC, Mohammed N, Savardekar AR, Patra DP, Nanda A. 巨大颅内脑膜瘤的外科治疗:手术细微差别、挑战和结局. *World Neurosurg.* 2018; 110: e32-e41.
66. Kurtsoy A, Menku A, Tucer B, Oktem IS, Akdemir H. 颅底肿瘤的神经导航. *Minim Invasive Neurosurg.* 2005; 48(1): 7-12.
67. Wiltfang J, Rupprecht S, Ganslandt O,等. 肿瘤或创伤患者侧颅底和前颅底的术中影像引导手术. *颅底.* 2003;13(1):21-29.
68. Heermann R, Schwab B, Issing PR, Haupt C, Hempel C, Lenarz T. 前颅底的图像引导手术. *耳鼻喉科杂志.* 2001;121(8):973-978.
69. Dorward NL, Alberti O, Velani B等. 成像后脑扭曲:大小、相关性和对神经导航的影响. *J Neurosurg.* 1998; 88(4): 656-662.
70. BrinkerT, Arango G, KaminskyJ, et al. 采用基于显微镜的神经导航系统进行图像引导颅底手术的实验方法. *Acta Neurochir (Wien).* 1998;140(9):883-889.
71. Thomale UW, Stover JF, Unterberg AW. 神经导航在经鼻蝶窦垂体手术中的应用. *Zentralbl Neurochir.* 2005; 66(3): 126-132; 讨论132.
72. Kajiwar K, Nishizaki T, Ohmoto Y, Nomura S, Suzuki M. 使用Mehrkordinaten Manipulator (MKM) 导航系统进行图像引导下经蝶窦手术治疗垂体病变. *Minim Invasive Neurosurg.* 2003; 46(2): 78-81.
73. Elias WJ, Chaddock JB, Alden TD, Laws Jr ER. 经蝶手术用无框架立体牵引器. *神经外科.* 1999; 45(2): 271-275; 讨论275-277.
74. 哈代J. 无框架立体定位术用于经蝶窦手术. *神经外科.* 2000; 46(5): 1269-1270.
75. Jagannathan J, Prevedello DM, Ayer VS, Dumont AS, Jane Jr JA, Laws ER. 单一机构经蝶窦手术中计算机辅助无框架立体定位:176例回顾. *Neurosurg Focus.* 2006; 20(2): E9.
76. Chu Y, Yang J, Ma S等. 基于增强现实的鼻内窥镜手术的注册和融合量化. *Med Image Anal.* 2017; 42: 241-256.
77. Bong JH, Song HJ, Oh Y, Park N, Kim H, Park S. 使用增强现实技术的扩展视野内窥镜导航系统. *Int J Med Robot.* 2018; 14(2).
78. Shahidi R, Bax MR, Maurer Jr CR,等. 图像增强内窥镜系统的实现,校准和准确性测试. *IEEE Trans Med Imaging.* 2002;21(12):1524-1535.
79. Schulze F, Buhler K, Neubauer A, Kanitsar A, Holton L, Wolfsberger S. 术中虚拟内窥镜用于图像引导下鼻内窥镜垂体手术. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2010; 5(2): 143-154.
80. Feigl GC, Krischek B, Ritz R, et al. 对用于颅底微创手术的基于体素的三维神经导航系统和透视图像渲染进行评价:一项解剖学研究. *World Neurosurg.* 2014;81(3-4):609-616.
81. Goertz L, Kabbasch C, Borggreve J,等. 术前三维血管造影可减少颅内动脉瘤夹闭术期间的缺血性并发症. *World Neurosurg.* 2018;120:e1163-e1170.
82. Wurm G, Tomancok B, Pogady P, Holl K, Trenkler J. 用于动脉瘤外科手术的脑血管立体光刻生物建模. 技术说明. *J Neurosurg.* 2004; 100(1): 139-145.
83. D'Urso PS, Thompson RG, Atkinson RL,等. 脑血管生物建模:技术说明. *Surg Neurol.* 1999;52(5):490-500.
84. Wurm G, Lehner M, Tomancok B, Kleiser R, Nussbaumer K. 脑血管生物模型用于动脉瘤手术:利用快速原型技术进行基于模拟的培训. *Surg Innov.* 2011; 18(3): 294-306.
85. Mashiko T, Otani K, Kawano R,等. 开发三维空心弹性模型用于脑动脉瘤夹闭模拟,实现快速低成本原型制作. *World Neurosurg.* 2015;83(3):351-361.
86. Kimura T, Morita A, Nishimura K,等. 使用三维模型对脑动脉瘤夹闭术进行模拟和培训. *神经外科.* 2009;65(4):719-725; 讨论725-716.
87. Wang L, Ye X, Hao Q,等. 两种复杂颅内动脉瘤三维打印模型的比较,用于手术模拟. *World Neurosurg.* 2017;103:671-679.
88. Marinho P, Vermandel M, Bourgeois P, Lejeune JP, Mordon S, Thines L. 颅内动脉瘤显微外科夹闭术术前模拟规划. *Simul Healthc.* 2014; 9(6): 370-376.
89. Stadie AT, Kockro RA, Reisch R,等. 用于规划微创神经外科手术虚拟现实系统. 技术说明. *J Neurosurg.* 2008;108(2):382-394.
90. Kockro RA, Killeen T, Ayyad A等. 在虚拟现实环境中进行动脉瘤手术的术前三维规划:技术和结果分析. *World Neurosurg.* 2016; 96: 489-499.
91. Wong GK, Zhu CX, Ahuja AT, Poon WS. 立体虚拟现实环境中颅内动脉瘤开颅夹闭术. *神经外科.* 2007; 61(3): 564-568. 讨论568-569.
92. Shono N, Kin T, Nomura S,等. 具有虚拟蛛网膜的交互式脑变形的大脑动脉瘤夹闭显微手术模拟器. *Oper Neurosurg (Hagerstown).* 2018;14(5):579-589.
93. Chugh AJ, Pace JR, Singer J, et al. 使用手术排练平台和改善动脉瘤夹闭术:一项前瞻性随机试验的结果. *J Neurosurg.* 2017; 126(3):838-844.
94. He H, Chen C, Li W, et al. 基于术前三维虚拟截骨技术的对侧入路治疗前循环动脉瘤. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 2019;28(4):1099-1106.