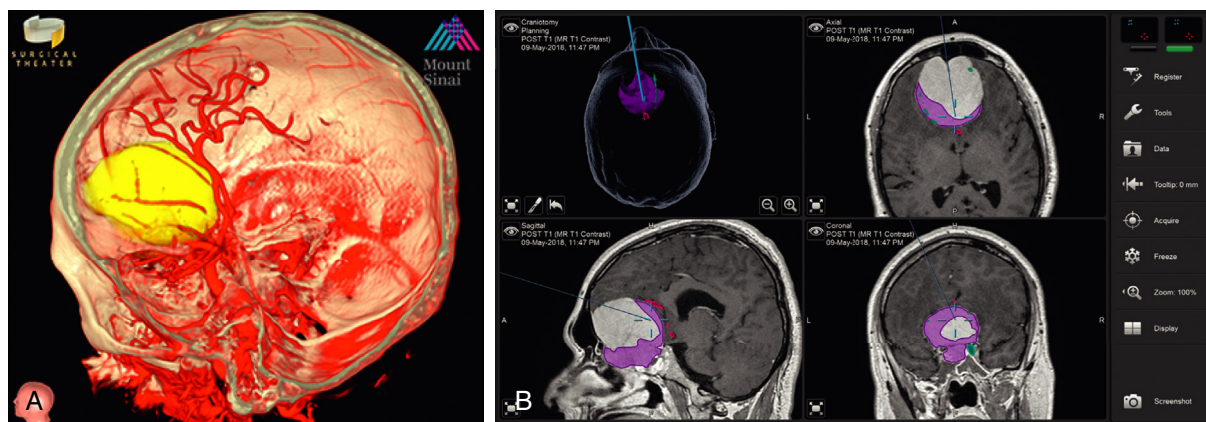


近期在无框架立体定位、显微镜集成、图像分割、三维重建、抬头显示 (HUD) 以及术中手术导航系统如导航更新方面的进展, 显示出改善神经外科手术质量的潜力, 特别是基于显微镜的脑部手术。如今, 外科医生能够将关于关键正常和病理结构及其解剖关系的详细患者特定信息直接应用于手术视野。这些技术可以将显微镜的视觉焦点与最相关结构的三维重建图像叠加在一起。当外科医生移动显微镜或调整焦深时, 投影到目镜并叠加在光学显示器上的信息会实时更新, 无需将注意力从手术视野转移到计算机屏幕或引入导航器械。此外, 最近推出的术中导航更新系统允许操作者

重新注册立体定位场以匹配术中解剖标志, 时间不超过2分钟, 无需术中CT、MRI或超声检查。这一进展有望显著提升手术导航的实用性, 并解决该领域中最持久且难以克服的问题之一——术中脑移位。这些不断发展的技术结合在一起, 有可能彻底改变神经外科医生的操作体验。本章描述了当前集成增强现实平台的工作原理, 包括增强现实实施的建议工作流程、成功实施的案例以及需要进一步开发的领域。读者可以将文中提出的想法应用于自己的手术规划和术中应用, 并了解该技术的局限性。



该病例展示了一位40岁的男性患者, 无显著既往病史, 因严重的视力丧失和嗅觉缺失前来就诊。其神经系统检查发现右侧视野下部视力为20/400, 左侧手指计数正常, 且存在上半身偏盲及嗅觉缺失。(A) 术前使用手术场景软件对患者解剖结构进行三维建模。(B) 术中结构更新显示肿瘤残留区域。详见视频32.1讨论该病例。

32 显微镜集成与脑外科的平视显示器

关键概念

- * 头部提示显示是一种增强现实技术，其中患者的解剖结构的数字表示被投射到真实的解剖结构上。目前，神经外科医生可以通过显微镜集成来使用这种技术。
- * 分割软件允许临床医生创建患者特异性解剖结构的三维表示，用于增强和虚拟现实环境。
- * 头显和三维模型都有助于神经外科医生将二维术前成像转化为对与手术干预相关的解剖关系的工作理解。
- * 注册错误通过患者解剖结构相对于手术开始时的注册位置的标量和平移偏移，在图像引导手术中造成不准确性。
- * 分割错误通过描绘不正确描述现实的解剖关系，造成图像引导手术中的不准确性。

增强现实（AR）平台是一种有前景的技术，能够将术前影像中的大量复杂信息转化为可用于指导神经外科手术的数字表示。通过将已知信息应用于真实场景，AR可以提升用户体验，使真实和数字信息都能立即用于解读。目前大多数应用涉及在视频屏幕、头戴设备或显微镜或内窥镜的眼镜中显示数字信息。这一过程的好处在于它能加速发现过程或影响决策，但不会强制执行特定行动。这与虚拟现实（VR）不同，在虚拟现实，虽然存在真实世界元素，但用户无法直接控制其中发生的事件。本章描述了当前集成AR平台的工作原理，并包括AR实施的建议工作流程、成功实施的案例以及需要进一步开发的领域。

增强现实技术对神经外科有什么贡献？

好的手术有一个逻辑过程。它始于对正常解剖和生理的理解。随着我们利用正常解剖和生理的框架来阐明病理发生的具体情况，手术逐渐深入；再利用这一框架进行矫正。有时，这些关系简单或显而易见：硬膜外血肿会导致神经功能障碍。

脑内肿块通过体积增大而增加占位效应。有时，这些关系是隐秘的：胶质母细胞瘤不仅通过占位效应和癫痫发生引起功能障碍，还通过脑部侵袭和破坏造成影响。无论哪种情况，我们都会根据对病理关系的理解来制定手术计划（例如，硬膜外血肿存在于硬脑膜和颅骨之间），并利用这些信息回答可能不那么明显的问题（例如，导致血肿发展的血管位置）。每次我们将导航探针引入手术区域，使用刺激探针寻找面神经，或用多普勒探头验证动脉血流时，我们都在为特定问题建立“事实依据”。

建立事实基础是手术决策过程中的中间步骤，也是AR最有益的時刻。我们关于病理的假设必须通过实际观察来验证，以设计解决方案。我们将硬膜外血肿识别为血凝块，因为其外观像血块，并且位于硬脑膜与颅骨之间。在手术室中，我们必须验证这两个关于病理的事实基础，以便恰当地确定寻找罪魁祸首血管的方向。例如，如果我们识别出的是血凝块，但实际上是位于硬膜下腔，那么确定责任血管的过程将会大不相同。

要理解增强现实技术对神经外科医生的潜在力量，重要的是反思成功手术的执行过程以及可避免错误的发生。一位经验丰富的神经外科医生会利用临床经验来评估手术成功的可能性，并预见为实现预期结果所需采取的步骤。当这种评估基于更丰富的经验时，良好的结果便会发生。1-3年经验益处主要通过两种方式体现：特定任务的运动技能精炼和对案例中可能遇到的问题的理解。我们认为，通过额外的认知准备，许多问题可以被避免。手术最有效的时候是外科医生能够看到即将遇到的解剖结构。标准术前影像可能会提示中线鞍上病变导致视神经侧向移位，但这种移位与颈内动脉和视交叉的关系可能不那么明确。AR允许外科医生在手术路径平面了解这些关系，而此时这种知识最为关键。根据我们的经验，大多数错误都与对手术病例特有的解剖特征准备不足有关。这与VR不同，在VR中，解剖关系可以在任何平面上查看，但在手术区域则不行。

认识到术中错误也可能具有系统性，我们也可以利用AR开发系统来预防其发生。尽管横窦不是大多数后颅窝病例的关键解剖结构，我们仍将其纳入AR中，以帮助提高我们在钻孔时对其位置的认识。我们的AR工作流程包含了详细的患者特异性解剖结构，具体针对患者的预期手术及其神经状况。当其运行良好时，可以减轻外科医生的认知负担，从而提高手术效率和技术准确性。

258.e1

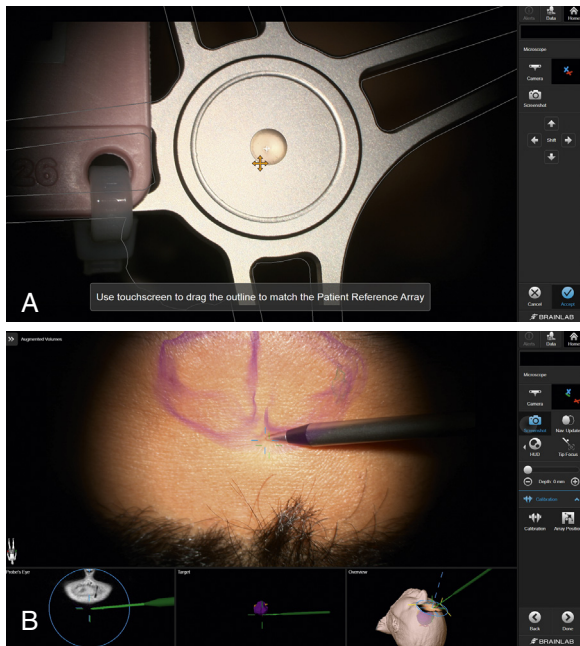


图32.1显微镜共配准和配准阵列/摄像机。图(A)显示显微镜与患者参考阵列的校准。图(B)显示了这种共配准，以及对皮肤上平视显示器的准确观察。

什么是增强现实？

AR是一个包含真实和计算机生成元素的沉浸式环境。数字信息（如视觉、触觉、听觉）用于增强现实体验。HUD是一种AR环境，其中视觉信息叠加在真实背景之上。显微镜与术前影像的共注册技术很早就被确定为实现手术室AR的方法。4,5正在开发的其他方法包括头戴式显示器、半镀银镜、投影仪和智能眼镜。6早期使用智能眼镜导航时，利用了运动捕捉相机和术前创建的三维（3D）模型。建模技术和全息导航目前使用开源软件，但分割过程较为手动。7,8当前的准确性测量取决于病变的深度和复杂性，以及用于构建AR模型的MRI和CT数据。尽管这些技术是否在临床上可接受尚不清楚，但随着患者特异性模型和导航整合的发展，这项正在发展的技术提供了许多无需手动操作的工作流程优势，并解决了部分视觉干扰问题。

显微镜共注册适用于Brainlab和Medtronic导航系统。这两个系统都使用一个固定的光学注册星，该星固定在显微镜上，并与患者体内的固定光学星对齐（图32.1）。显微镜聚焦到星上的特定中心点，以便目镜中的焦点可以像立体定位探针一样被跟踪。术前计划的视频显示投影会注入显微镜的目镜中。这些数字叠加信息会在常规共焦光学视野中可视化。由于它通过导航系统进行跟踪，因此视角、焦点深度和变焦放大率都在图像和导航屏幕上显示（图32.2和视频32.1）。

目前，术前影像可以以两种方式显示：直接显示（“画中画”）术前影像和抬头显示器（HUD）。直接显示带来

将数字二维（2D）放射学图像显示在操作者的目镜中（见图32.2H-I）。显示器会随着显微镜焦点的变化而变化，仅显示与焦点相交的平面。这种表示方案的优点包括能够持续访问某些术前影像（目前并非所有扫描参数都兼容此显示），不会使焦点的信息变得模糊。缺点是外科医生必须从手术区域移开视线去看图片中的图片，数字图像的质量相对较差，且一次只能查看一个成像序列。

通过术前影像的3D处理和体积渲染，可以实现HUD（见图32.2E-L）。分割是放射学数据后处理的一种技术，用于重建解剖结构的3D模型，以查看特定结构而不是投影平面。Brainlab、Medtronic、Synaptive和Surgical Theater都有专有的程序，旨在自动分割脑结构。最后，所有平台还允许用户手动绘制，这是分割感兴趣结构或区域的最简单方法。Brainlab和Medtronic系统允许这些分割后的结构（手动或自动）叠加到显微镜的目镜中，形成一个与患者注册的HUD。绘制的对象可以以2D形式显示，深度信息则用实线和虚线表示，其中实线代表显微镜的视平面。更近的方式提供了类似3D全息图的物体叠加效果，从视频输出中叠加到显微镜的目镜中（见图32.2E-F）。HUD的优势在于，基于结构的分割可以从多种术前扫描序列中获取（例如，动脉解剖来自血管造影，颅神经解剖来自颞叶序列），使用户能够综合术前影像，构建病理解剖最重要的特征的3D表示。这种分段模型，而不是特定的序列，被投射到目镜中，使其始终可访问并与真实结构重叠。缺点包括使用数据的学习曲线、优化设置以方便使用的需要、可视化限制以及后续部分概述的误差来源。

执行

许多实施HUD和导航跟踪所需的元素已经包含在标准术前工作流程中。获取校正扫描、进行有效的结构分割以及以一种方式布置手术室，使信息可以随时访问，是HUD规划与标准检查不同的主要领域（图32.3）。除此之外，优化HUD以增强外科医生感知和理解的过程取决于用户。

术前准备

我们的AR工作流程的第一阶段是收集数据，以创建患者病理的基本3D VR渲染。虚拟现实模型随后被引入患者咨询中，作为患者教育的基础，并帮助阐明病理或手术计划（图32.4）。这一步骤帮助我们认识到一些细微（有时也不那么细微）的神经学发现，这些发现虽然不是主要投诉，但对手术计划和患者的康复至关重要。这些模型还可以用于临床教学会议和住院医师培训。三维重建已被证明能增强学习者以及非临床医生的解剖学理解，我们以此为基础，与患者及其家属讨论病理问题。最后，虚拟现实模型用于指导AR模型的分割策略，该模型将在HUD中使用。

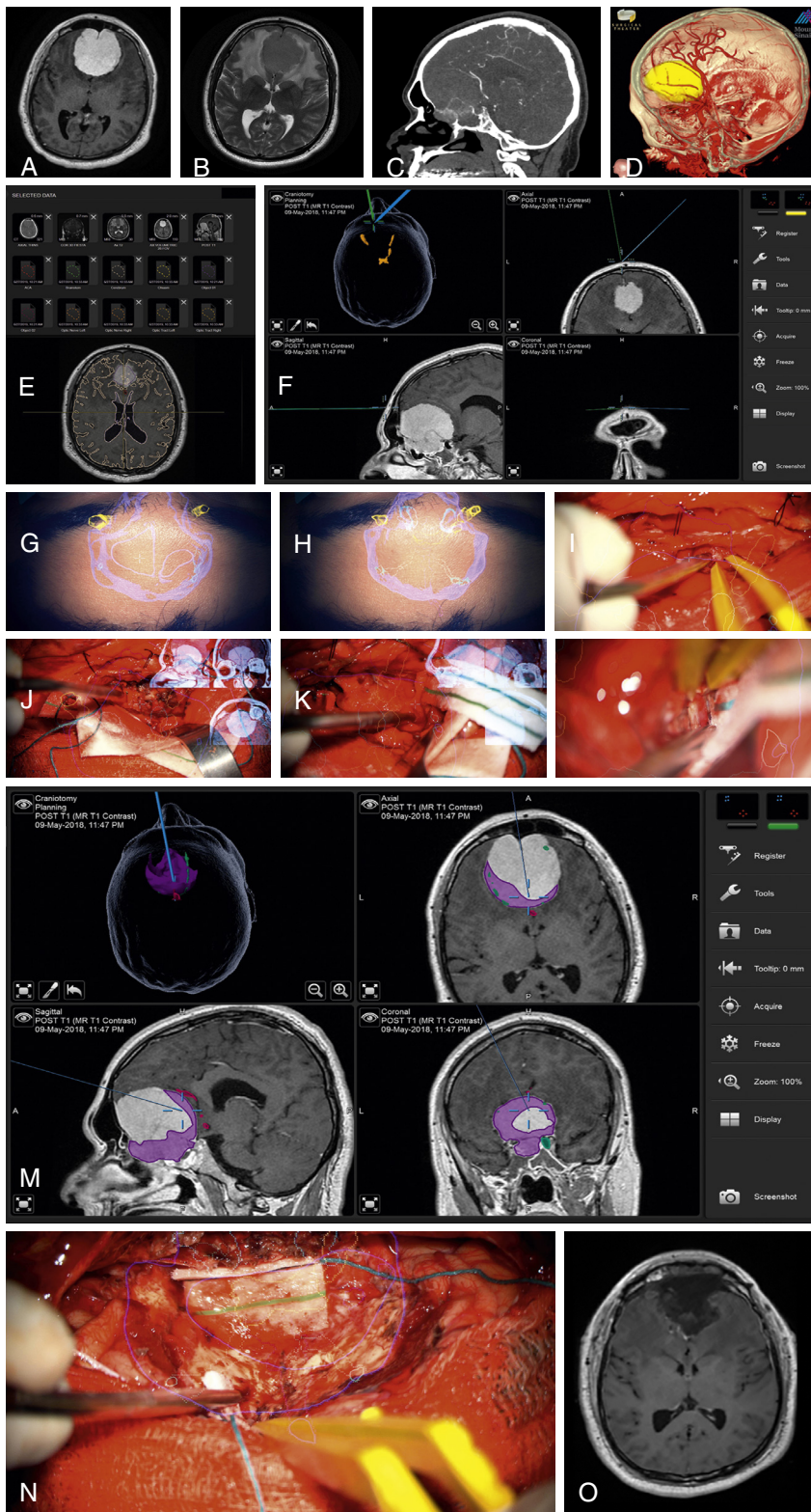


图32.2. 案例1。一位40岁的男性患者，无显著既往病史，因严重的视力丧失和嗅觉缺失前来就诊于内科医生。他的神经系统检查显示右侧视野下部视力为20/400，左侧手指计数，以及嗅觉缺失。(A)术前轴向增强T1 MRI。(B)术前轴向T2 MRI。(C)术前矢状CT血管造影。(D)使用Surgical Theater进行的患者解剖三维规划。(E)通过atlas分割和Brainlab SmartBrush手动分割相结合的方法选择扫描和关键结构分割。(F)通过将显微镜聚焦在放置于患者皮肤上的配准探头上验证的配准。(G)通过显微镜目镜显示的分割构建体叠加在视野上的抬头显示视图。目镜的焦深位于皮肤表面之下，允许显示分割的颅内结构。(H)深焦显示，允许切除某些分段结构，揭示分割模型的更深层部分。(I)开后硬脑膜后覆盖在大脑表面的头部显示。视神经（黄色）和肿瘤（紫色）的投影有助于快速识别肿瘤囊周围初始解剖平面。实线表示显微镜当前焦深处的结构边界。虚线表示显微镜视野平面上结构的最大边界。(J)操作视野的画中画和头部显示。画中画显示标记点以指示操作显微镜的焦点。头部显示根据当前显微镜角度、焦深和放大倍数调整分割模型的显示，以勾勒出患者的解剖结构。(K)操作视野的画中画和头部显示，指示未解剖的前极动脉（绿色）接近位置。预见这一结构使得手术可以高效地进行，直到外科医生接近预期的动脉区域。(L)前极动脉（绿色）的识别。估计的配准误差/脑移位约为3毫米。(M)术中结构更新显示肿瘤残留区域。(N)切除后腔隙。肿瘤边界（紫色），前极动脉（绿色），大脑前动脉（粉红色），视神经（黄色），颈内动脉（蓝色）。(O)术后增强T1 MRI显示完全切除肿瘤。患者术后恢复良好，于术后第3天出院回家。他的视力显著改善。

扫描采集参数

影像学研究在规划肿瘤切除及其他占位性颅内病变的手术方法中起着关键作用。高分辨率磁共振、小视野（FoV）序列能够更详细地分析肿瘤位置，包括重要邻近结构如主要血管和功能区脑实质的存在情况。这些序列还可以直接被介入医生用于术中引导。

体积序列通常采用T1加权和增强对比，能够最好地评估感兴趣病灶的边界以及对周围结构的侵犯情况。在评估血管畸形时，可能更倾向于使用轴向T2加权体积序列，因为小血管和大血管结构中都会出现流动空隙，从而可以清晰显示主要的动脉和静脉结构。与某些磁共振序列不同，这些序列可能在矢状面上获取，然后重新格式化以创建轴向视图，而体积序列则是作为完整的头部和大视野的真正轴向序列获得。因此，所有成像数据均直接对应于患者的解剖结构，并且不会出现重建轴向序列时可能出现的伪影。

模拟序列使用磁共振成像仪获得最高可能分辨率。这些序列获取的切片厚度小于1毫米，且各向同性。与体积序列一样，它们以真正的轴向方式获取。某些软件可以利用模拟序列的数据生成展示肿瘤、正常脑实质、脑室和颅骨包括颅底的三维模型。这些模型可以通过头部专用CT血管造影（CTA）增强血管分辨率，以及通过头部体积CT成像增强骨骼分辨率。扩散张量成像利用水沿白质束的扩散来重建概率路径位置，也可以增强三维模型。所有来自这些模拟序列的数据都可以上传到特定软件中，该软件可以投影生成的结果。

在手术过程中直接将模型应用于患者，提高外科医生方法的准确性和信心。

选择必要的分割序列取决于患者的病理情况，并受预期手术方法的轻微影响。例如，在计划前额入路治疗前颅底鞍旁病变时，识别手术路径中遇到的前交通动脉和颈动脉（来自CTA）、视神经（T2高分辨率）以及肿瘤（体积T1）是有帮助的。表32.1描述了标准位置和病理中最常进行的术前影像学检查。

手术计划

确定要在VR或AR模型中包含哪些结构取决于所采用的方法，并且需要操作者对该方法有足够的经验，以了解哪些信息最有可能是有用的，哪些可能不太相关。表32.2展示了我们通常为最常见方法和病理学分割的结构。一般来说，病理（如肿瘤、动脉瘤、动静脉畸形、瘘点）被识别为一个独立的结构。在此基础上，识别出关键的相邻结构是必要的。大多数最终的AR模型包含两到四个独立的结构（见表32.2）。我们发现基于图谱的分割（自动分割）对于近端动脉和视神经的眼内部分是有帮助且可靠的。当这些结构因病理显著改变时，其可靠性降低，对于其他颅神经或小于2毫米的结构则不可靠。半手动分割有助于描述增强结构、骨解剖和纤维束追踪。这些程序在创建虚拟现实环境和隔离特定功能纤维束方面非常有用。手动分割（“绘画”）可用于区分具有解剖边界但与邻近组织放射学特征相似的结构。目前，这也是在Brainlab和Medtronic系统中显示HUD时唯一能够表示结构的方法。

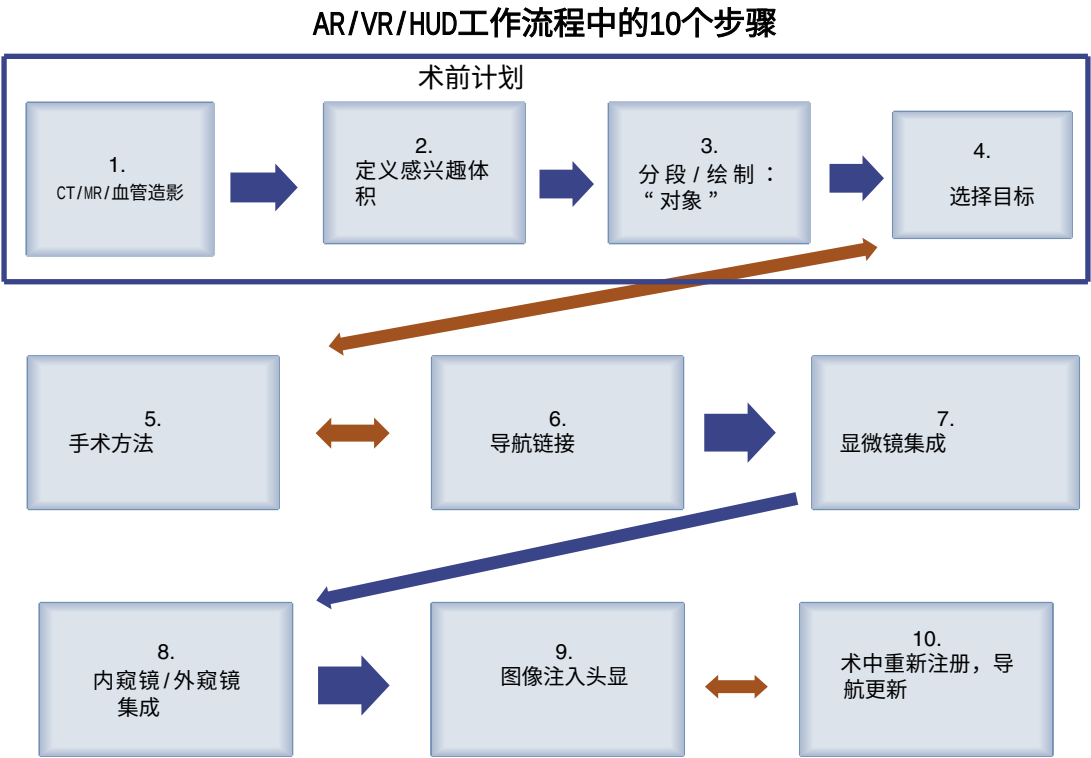
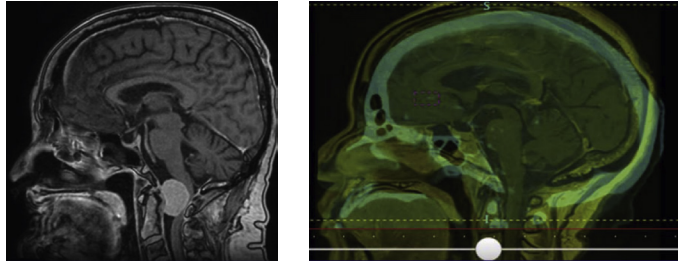


图32.3. 增强现实技术在临床实践中的工作流程图。

术前计划

1. 扫描采集

采集高容量图像序列并进行融合-MRI、CT、CTA、Angio。



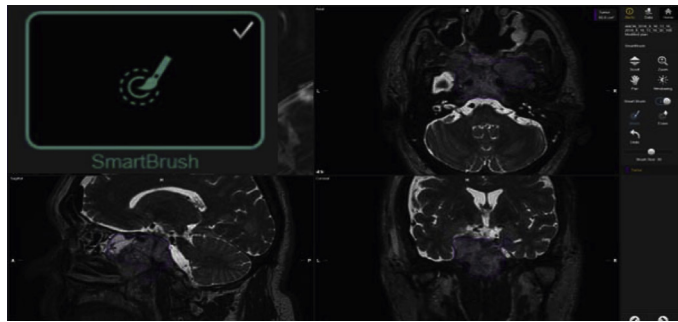
2. 定义关注的体积

使用解剖结构的三维表示进行患者特异性或病理学特异性咨询。



3. 切片/染色病理学

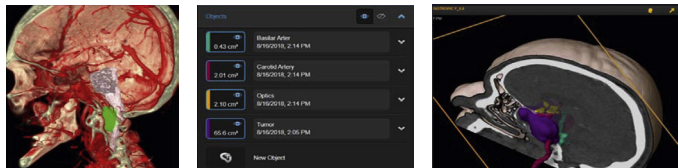
使用解剖结构的3D表示进行患者特异性或病理学特异性咨询。



手术计划

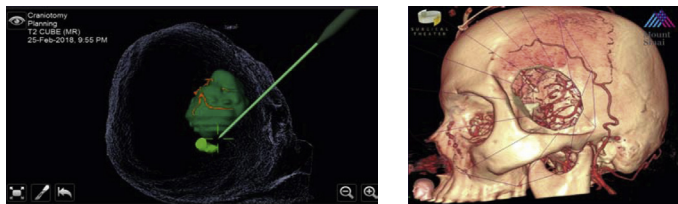
4. 选择对象

使用解剖结构的三维表示进行患者特异性或病理学特异性咨询。



5. 手术方法

使用解剖结构的三维表示进行患者特异性或病理学特异性咨询。



术中使用

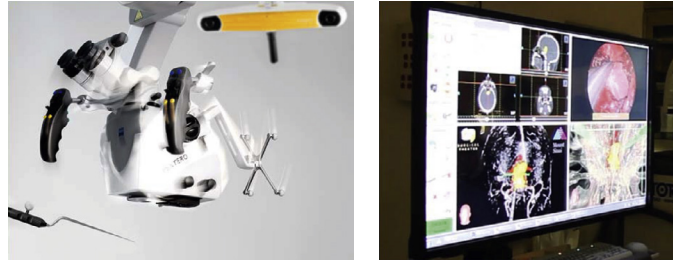
6. 导航链接

通过称为配准的过程，将当前位置与解剖结构连接起来的患者特异性手术导航



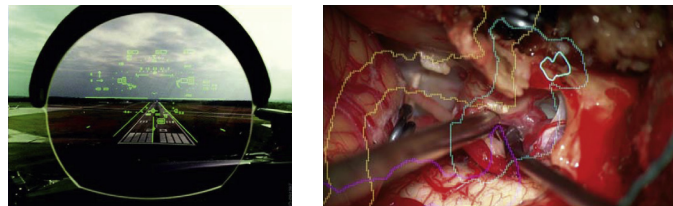
7. & 8. 整合

显微镜与参考阵列共定位患者解剖结构



9. 图像注入，抬头显示器

在不分散注意力的工作流程中显示信息



10. 术中重新登记和对象更新

在手术阶段，医生可以实时更新平视显示器的视图，使其准确反映患者解剖结构

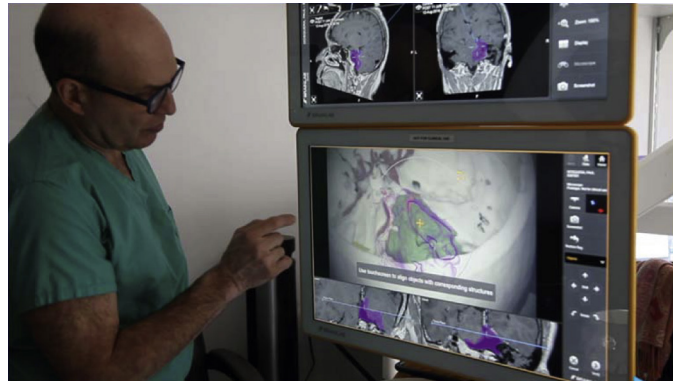


图32.3，续



图32.4. 由以下人员进行的三维模拟咨询
高级执业医师。

在绘制任何特定结构之前，我们回顾术前数据，以找到对该结构最敏感和特异的序列或系列。几乎每个模拟模型都涉及一个或多个血管结构。我们倾向于使用CTA进行大多数动脉分割，但通常也可以基于这种成像来分割静脉解剖。如果使用选择性导管血管造影的体积数据，可以实现非常高质量的血管分割。Brainlab和Stealth软件允许用户根据主观评估绘制结构。我们首先绘制解剖位置在个体间高度一致的结构（例如，颈内动脉），并利用这些结构推断传出分支的位置。

颅神经分割最好使用对脑脊液敏感的序列（如T2、FIESTA、CISS）。我们从远离病变区域开始绘制，以便能够具体识别神经。利用这些信息作为框架，我们逐步向感兴趣区域推进，在每一步中识别出神经。

表32.1按病理位置列出的三维重建扫描参数

病理学位置	中程截击机	CT/CT血管造影	其他MRI 研究	其他研究
颅底前部	轴向体积	CT头部CT鼻窦 CTA显示血管受累	垂体：小FOV T1和T2高分辨率（CISS，FIESTA） 轨道：小FOV T1和T2高分辨率（CISS，FIESTA） 加上斜位T2脂肪饱和序列 IAC：小FOV T1和T2高分辨率（CISS，FIESTA） 小FOV T1和T2高分辨率（CISS，FIESTA）	
中颅底后窝	轴向体积	CT头像 CTA显示血管受累 CTA显示血管受累	如果为皮质：包括包含DTI的模拟方案	三维自旋血管造影 三维自旋血管造影
AVM/AVF动脉瘤	轴向体积	全头CTA 全头CTA		
	轴向体积			
	轴向体积			
	矢状T2立方体MRV， MRA			
3D，三维；AVF，动静脉瘘；AVM，动静脉畸形；CT，计算机断层扫描；CTA，CT血管造影；DTI，扩散张量成像；IAC，内耳道；MRA，磁共振血管造影；MRV，磁共振静脉造影。				

表32。病理学位置概述的2个关键结构

位置病理	标注肿瘤	标注动脉瘤	标注AVM	其他病变血管	窦性心律	标注彩绘神经	总计（179）
ACA		3	1	1		1	3
颅底前部	54	1		46		45	54
小脑	3		2	1	1	2	5
额叶	18		1	1	1	7	20
海地		6		2		2	6
MCA		8		7			9
中颅底	32		2	1	1	28	34
枕骨	4		2		1	2	4
顶叶	3			1		2	4
PCA		1					1
PICA		3					3
颅底后部		5		4		4	5
SCA		1					1
颞叶	9		1	2		5	12
其他的	14		3	1	7	9	18
ACA，大脑前动脉；ICA，颈内动脉；MCA，大脑中动脉；PCA，大脑后动脉；PICA，小脑后下动脉；SCA，小脑上动脉。							

在许多情况下，我们发现最终会达到识别结构的极限。某个时刻，血管腔变得过于狭窄，颅神经与周围解剖结构不再明显区分，或者纤维束无法进一步限制。当出现显著不确定性时，我们将不会对结构的位置做出预测。我们认为，在这些情况下，信息的缺失有助于外科医生了解不确定性的程度，我们相信这有助于减少错误信息被用于建立事实决策的可能性。这个限制似乎在某种程度上取决于用户，对解剖结构或界面不太熟悉的团队成员往往比经验丰富的成员更早地接近这个限制。

裁定和模型修改

在手术室使用前，我们会在多学科会议上回顾病例、术前影像和模型本身。这有几个目的。我们利用虚拟现实技术的外科手术剧场模拟来逐步了解病例。与增强现实相比，虚拟现实平台允许不受限制地讨论不同方法的风险和益处，生成关于重要位置及其关系的假设。

解剖结构，以及预测成功最可能路径的能力。它为病例中遇到的关键结构的顺序和配置提供了一种空间预示，同时也为异常但非关键的解剖异常（例如，先前开颅手术的位置）提供了预示。通过这次行走，我们能够识别出完成手术所需解决的重要问题（例如视交叉相对于肿瘤的位置），以及是否有额外的信息有助于构建模型。如果需要，在患者进入手术室之前，可以绘制额外的结构或进行其他微调。

实践

显微镜集成

除了分割功能外，显微镜集成本身相比传统显微镜使用有两个主要优势。首先，它允许外科医生在整个手术过程中轻松访问最重要的术前影像。当遇到解剖问题时，外科医生无需离开手术区域去查看灯箱或导航显示器上的图像。相反，外科医生可以在显微镜的屏幕上参考这些图像。

表32.3带头显示的实用性	
病理学/外科手术	效用度量
轴内/浅表病变	
颅底病变	皮肤切口开颅术 硬脑膜切开脑皮切口头/床定位 硬膜外和硬膜内钻孔
血管病变	蛛网膜分离皮肤切口开颅术 蛛网膜解剖 头枕/床定位开口
经蝶入路	硬膜外 颅内钻孔硬脑膜切开术

并继续操作。例如，在执行可能危险的任务，如钻探前蝶骨突时，能够在钻头旋转并进行实际钻探时“看到”颈内动脉的确切位置和边界，这比停下来查看屏幕或图像界面并记忆解剖结构要更有帮助。第二个优点是，它允许显微镜的显示区域坐标精确地由术前影像描述。与其使用立体定向探针选择未知结构并可能对其造成损伤，不如将显微镜聚焦在不确定区域，并在术前成像中对整个区域进行研究。

一旦显微镜与导航系统核心对准，AR软件即可通过目镜应用，并在操作过程中多个点使用。我们发现它有助于评估患者定位的充分性、确定最佳皮肤切口和开颅位置，以及在整个蛛网膜分离过程中（表32.3）。10,10a

注册

美敦力和赛纳维使用一种光学注册系统，该系统通过红外摄像头定位刚性头部固定装置上的不透射线球体，实现被动跟踪和精确度。脑实验室则在其参考框架上使用反射球体，用于患者、显微镜和工具。对于光学注册，所有三个导航平台（赛纳维、脑实验室和美敦力）都在特定几何形状的仪器和患者阵列上使用球体，这些球体反射光线以传达患者定位、工具导航及其他待集成设备的信息。患者注册在患者体表点与正交图像上的相应点之间创建了一个三维地图，使用户能够在所有平面（轴向、冠状和矢状）中定位自己的位置。每个导航系统都有独特的标准化工具，这些工具通过摄像头视觉和软件易于识别。使用这种方法时，考虑摄像头的定位非常重要，因为必须确保摄像头、患者参考阵列和工具之间有清晰的视线。

验证高质量配准可能具有挑战性。我们发现，主要使用表面解剖结构（如额头和面部）进行配准最为成功，通过在发际线后方和枕骨结节及顶骨结节之间使用少量点来支持深度计算，并且对于含有大量软组织的解剖位置（如枕骨结节下方的颈部和颞窝或鼻梁下方的脸部）限制取样点的数量。配准完成后，我们通过验证探针在轴向、矢状面和冠状面上的正确跟踪来确认这一过程。我们寻找与皮肤轮廓完全吻合的跟踪，并在探头似乎追踪到表面之上或之下时做记录。我们通过使用立体定位探头和显微镜聚焦于一个共同位置来验证共配准过程。软件应该

将显微镜的焦点和立体定位探针的点表示为同一位置（见图32.1B）。如果存在3 mm或更大的差异，则重新开始配准过程。

术中调整

手术干预导致的患者解剖结构的扭曲和变化是一个广为人知的现象。11-13脑移位是整个手术过程中维持颅内结构配准的不可避免障碍。没有图像引导导航，外科医生不得不依赖其他方法来建立真实情况（如术中神经监测、微血管多普勒和大体检查）。术中磁共振成像（iMRI）就是为了应对这一问题而开发的，因为它可以描述与相关解剖结构的移位以及系统的扭曲。14-16然而，iMRI成本高昂且耗时。这引起了人们对开发替代再注册策略的兴趣。

重新注册的一个可能途径是利用分割模型。大多数模型包含病理和正常解剖结构，且与病例的关键部分密切相关。导航更新是由Brainlab开发的一款用于术中重新注册的应用程序。它使用显微镜共配准和HUD来投影分割模型或平面放射学研究。然后可以通过平移调整这一投影，以适应通过目镜可见的真实解剖结构（图32.5）。结构更新是Brainlab开发的另一款应用程序，允许在表面配准后重新定义先前分割的结构拓扑（见图32.5K）。这使得可以在术中计算部分切除肿瘤的体积。其他旨在表征组织变形和肿瘤切除范围的软件目前正在开发中。这些软件的发展为脑移位的软件解决方案奠定了基础。17-19

错误

根据我们的经验，在AR显示和显微镜集成中遇到的错误主要分为两类：注册错误和分割错误。注册错误会导致数据显示中的帧移或标量型不准确性。这意味着建立具有特定结构的真实情况可能既困难又不可能，但这不会改变操作策略。分割错误则会导致解剖学或病理关系的虚假表示。未能识别分割错误可能导致真实情况建立不当或效率低下，因为用于构建后续真实情况的逻辑框架不准确。避免这两种错误的策略涉及不同的支持系统。

注册错误

通过在患者术前影像和术中定位之间创建最大重叠以及优化手术室的工作流程，可以最好地管理注册错误。最终，通过设计所有可能表面位置的掩模，并使用已知点（例如鼻根）将该掩模三角化到术中患者位置来实现注册。更全面的矩阵将允许使用更多种类的已知点进行匹配。这正是为什么要在注册扫描中最大化放射影像切片数量的原因。关于如何优化注册扫描的更深入讨论，请参见本章前面的“扫描采集参数”部分。

在注册中，精确度还取决于保持患者参考阵列与患者之间关系的精确度。作为物理结构，患者和阵列在手术过程中都容易发生移动，这可能导致不准确。为了保持精确度，我们倾向于使用刚性头部固定，并且我们使用

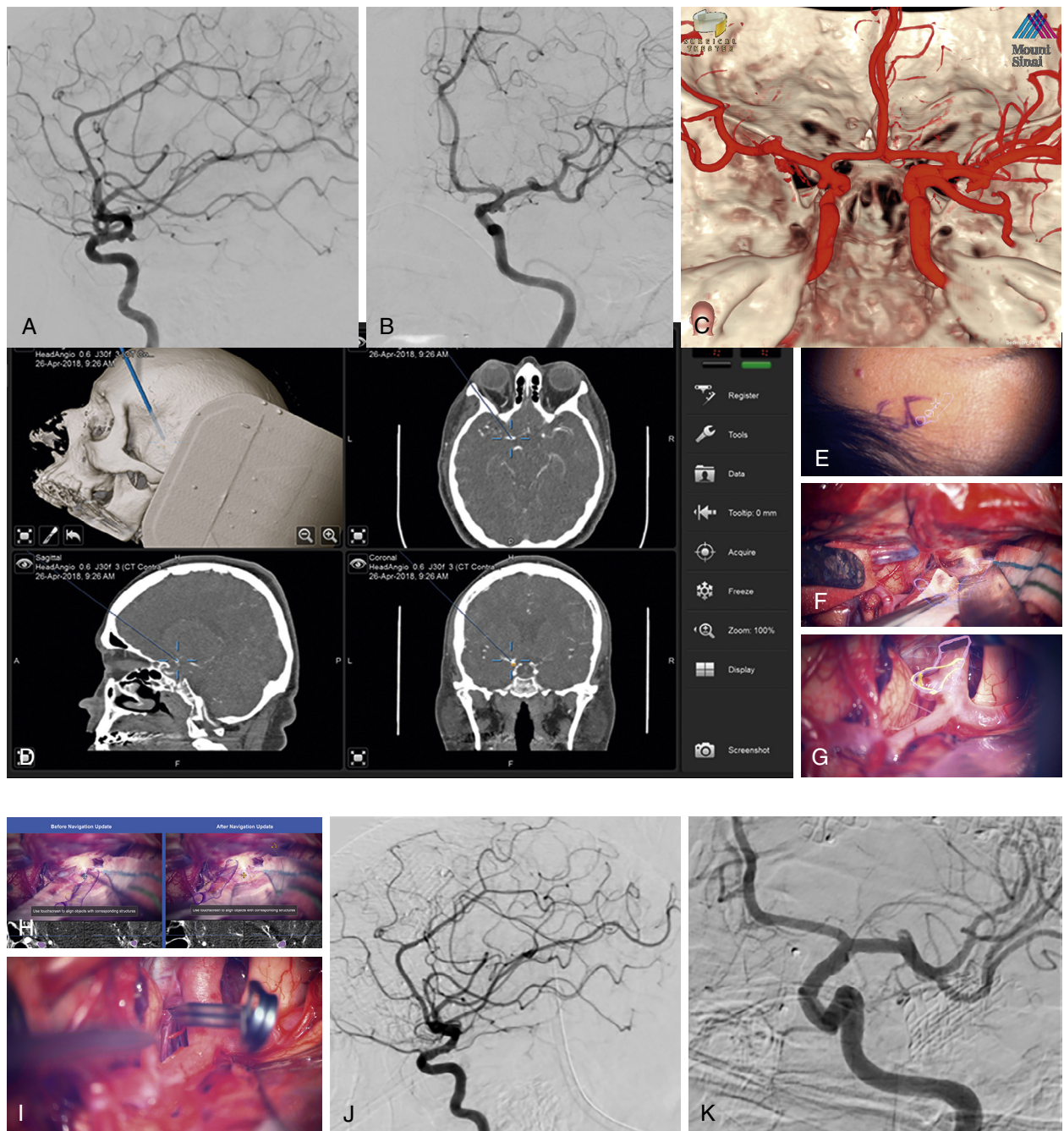


图32.5. 案例2. 一位55岁的女性患者，有动脉瘤性蛛网膜下腔出血家族史，因头痛接受评估。检查发现五个动脉瘤（左侧大脑中动脉、左侧前脉络膜动脉、左侧后交通动脉、右侧前颞动脉和右侧颈内动脉分叉）。(A) 术前数字减影血管造影，侧位视图。(B) 术前数字减影血管造影，前后位视图。(C) CT血管造影的骨和血管三维重建。(D) 导航显示术前关键结构以紫色和金色标出。(E) 抬头显示器显示传出动脉、传入动脉及动脉瘤顶部的位置，并确认头部定位足以实现手术目标。(F) 抬头显示器显示颈内动脉和大脑中动脉（紫色）以及前脉络膜和后交通动脉动脉瘤（金色）。(G) 额头显示展示了前脉络膜动脉瘤的穹顶，仅有轻微偏移（~3毫米）。(H) 使用导航更新进行了调整。(I) 左前脉络膜动脉瘤夹闭术后。微血管多普勒显示流出道通畅。(J) 术后数字减影血管造影显示左前脉络膜动脉、左后交通动脉和左大脑中动脉分叉处动脉瘤闭塞，流出道通畅。侧位图。(K) 术后数字减影血管造影显示左前脉络膜动脉通畅，动脉瘤闭塞。患者术后恢复良好，已出院回家。

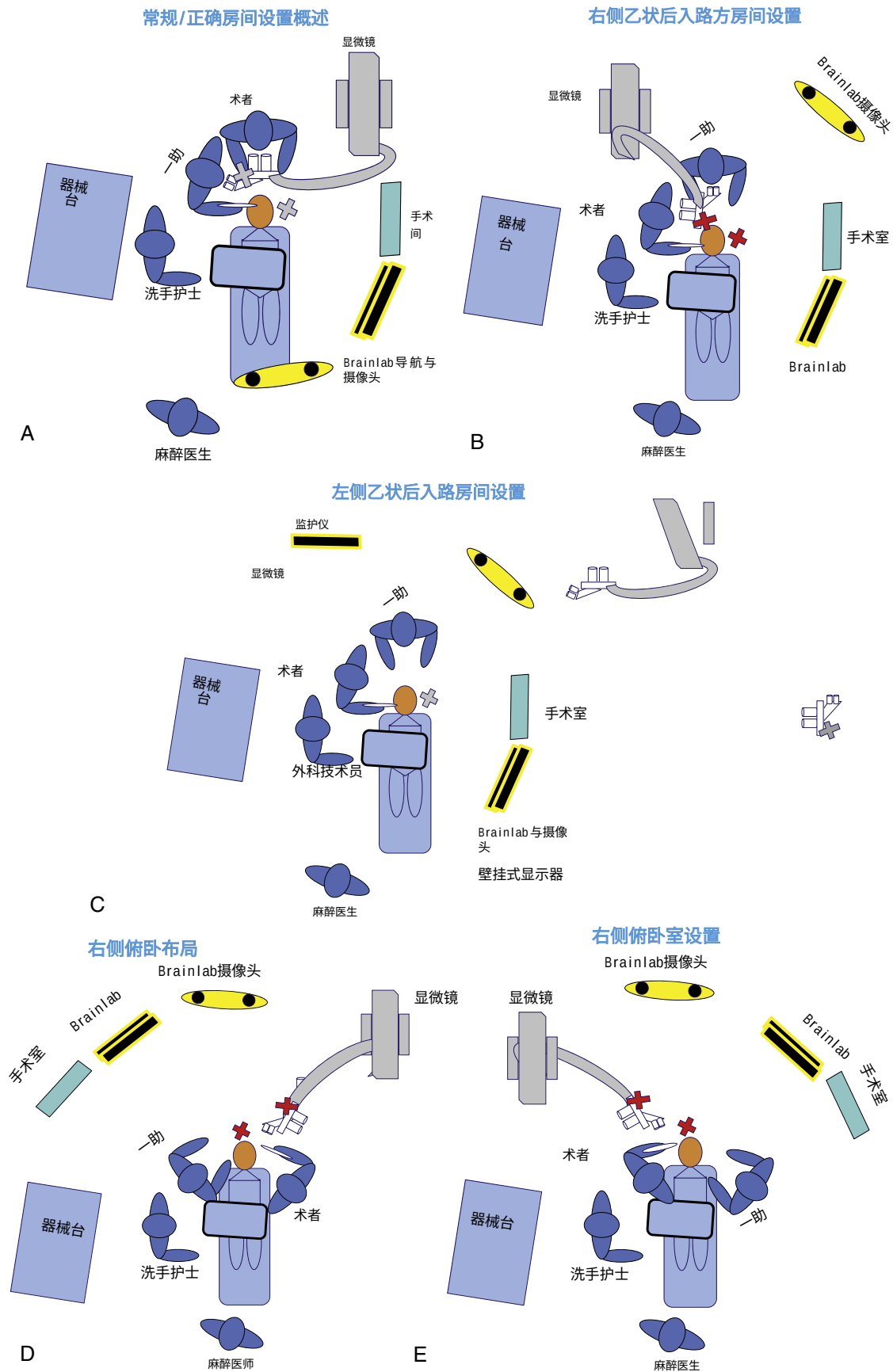


图32.6. (A-E) 标准颅底手术方法的标准手术室设置示意图。

一种手术室布局，避免了导航设备（图32.6）的移动或操作。每个手术室的实际限制略有不同，但导航设备的最佳工作位置需满足以下需求：（1）在整个手术过程中保持整个导航设备/探头与摄像头的持续直接接触，（2）服从手术室其他工作区域的要求（例如麻醉师在患者气道、麻醉机和麻醉台之间的工作三角区），（3）增强而不妨碍手术室内现有的通信路径（例如显微镜显示屏、外科医生和洗手护士之间的三角区）。

一旦检测到注册错误，可以采用三种策略来克服这些错误。第一种是重新注册患者。根据操作过程中错误的时间或表面标志的可用性，这可能并不总是可行。第二种是改变参考扫描和扫描窗口，以形成更好的患者表面解剖掩模。第三种方法是将分段模型作为配准掩模，以便仅使用术中解剖结构对患者进行重新配准（导航更新）。

分割错误

分割错误最好通过获取能够特异性识别感兴趣结构的影像来管理，并仅在达到其特异性极限之前使用这些影像。根据感兴趣的结构不同，可以采用不同的扫描参数来隔离它。例如，在T1 MRI上，钆对比剂能很好地特异性识别脑膜瘤与其他周围正常解剖结构的边界，但在T2序列上则表现不佳。因此，我们通常使用增强后的T1序列来分割大多数肿瘤。然而，有些结构无法仅凭对比剂吸收情况区分，对于这种情况，我们倾向于依赖那些对脑脊液敏感度非常高（如fiesta、CISS）、对骨骼特异性非常高（如CT）或对分子组织特征梯度变化特异性很高的（如flair）的研究。

创建一个准确且有用的手术病理分割模型，依赖于术前影像的适当外推，并且在结构选择上需谨慎。例如，对于患有后交通动脉瘤性蛛网膜下腔出血的患者，同时伴有脑积水可能具有临床意义，但这通常不是动脉瘤夹闭术的直接焦点。一个构建良好的分割模型应包含所有与病例相关的结构位置信息以及最少的额外信息。在这种情况下，理想模型应包含同侧视神经、同侧颈内动脉、前脑动脉和中脑动脉、后交通动脉、前脉络膜动脉（如可能）以及动脉瘤的位置。关于其他结构位置的额外信息（例如，脑室或对侧视神经）通常没有帮助，且常常会有些分散注意力。

只有理解了错误的来源，才能解决分割错误。对边界或结构位置的假设可能会产生错误。然而，如果基于低结构特异性扫描对结构进行分割，这也会产生错误。例如，CTA对血管边界有明确的区分，但在区分动脉和静脉时则不那么具体。最终，如果无法充分理解错误的来源，我们更倾向于从分割模型中删除该结构。这有助于保持模型的完整性，以便解决问题。

在外科教育中的作用

不断上升的医疗保健、医学教育成本，以及社会对患者安全优先地位的期望的变化，都鼓励了这一趋势

外科教育中兼职教师的发展。20训练生被迫在工作时间限制与医学知识的不断扩展以及对普通和专科技能掌握作为培训项目内可实现目标的期望之间挣扎。21学习工具和技术辅助设备的发展正在帮助弥合这些差距。22、23目前的文献主要关注VR和模拟器在教学外科和神经外科技能方面的作用。24-26对AR应用所起作用的兴趣可能正在增长。9、27、28

在我们的实践中，AR尤其是手动分割在颅底神经外科教育中扮演着重要角色。住院医师通过选择分割结构和使用最佳解剖研究来创建模型，展示了他们在解剖学和手术理解方面的能力。通过显微镜目镜投射绘制的结构，学生能够看到定位操作的影响，从而在更短的时间内完善这一过程（图32.7）。最后，分割可以指导中级住院医师完成部分手术步骤（例如，在翼状颅骨切开术中的蝶翼钻孔），并减少监督。

有待改进的领域

AR技术仍处于起步阶段，不仅在神经外科领域，而且在许多其他技术应用领域也是如此。因此，我们可能仍然不了解其应用和优化的许多方面。一些研究领域取得了显著成果，包括对增强现实如何通过增加眼睛疲劳和认知负荷加剧操作员疲劳的理解。据认为，眼睛疲劳是由于原始物体与其增强投影之间的调节和辐辏差异造成的。在大多数增强现实应用中，数字信息以固定点显示在屏幕上，焦点位于光学无限远。相比之下，现实世界的信息通过同步调节调节和辐辏来感知三维空间。为了同时感知这两组信息，瞳孔必须适应屏幕，而眼睛则聚焦在其后方的某个点。这导致了能量消耗的增加。尽管用户可以采取许多简单措施来减少眼睛疲劳，例如改进注册技术和使用优化立体视觉的绘画技巧，但技术进步很可能在这方面提供帮助。

神经放射学和分割软件的进一步发展可能会逐步推进AR。随着追踪技术、光谱分析和先进标记技术的进步，我们预计在重要神经结构的特定标记方面会有改进。随着磁场强度优化的进展，亚毫米级结构的离散识别也可能成为可能。随着这两个神经放射学领域的不断发展，我们期待能够开发出自动生成多维患者特异性模型的计算机程序。随着纹理分析算法的改进，它们也可能开始为我们提供有意义的纹理数据，这些数据也可以被增强现实所利用。

注意力缺失

注意力盲视，即用户在专注于特定任务时，将重要事件排除在意识之外的能力，在增强现实应用中可能干扰生产力。31经典上，注意力盲视被描述为一名体育迷在被要求数篮球比赛中的罚球次数时，未能看到身穿大猩猩服装的人。尽管这种“隧道视觉”有可能影响对任何类型操作的感知和理解，但有数据表明，AR对其发生的影响更为强烈。32、33我们认为注意力盲视问题具有动态性，是进一步研究的重要领域。通过精心构建的分割

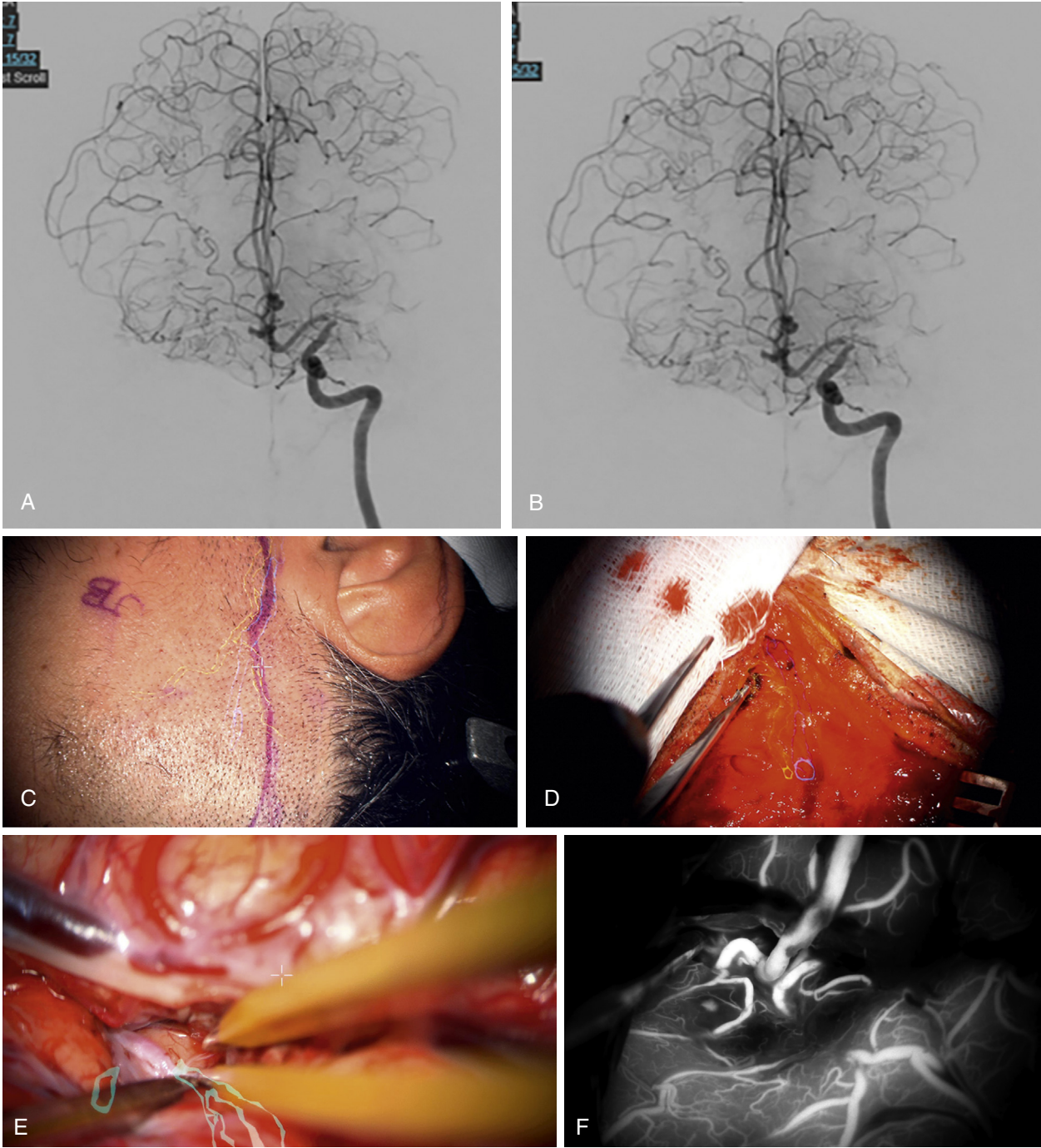


图32.7. 案例3. 一位47岁的男性患者，有高血压病史，因表达性失语症发作频率增加且严重而前来就诊。检查结果提示双侧烟雾病。患者接受了左侧颞浅动脉（STA）至大脑中动脉（MCA）旁路手术，并于6个月后返回接受右侧大脑中动脉狭窄治疗。(A)左颈内动脉数字减影血管造影显示近端大脑中动脉闭塞，通过前脑动脉（ACA）和后脑动脉（PCA）形成侧支循环。MCA区域动脉充盈延迟。(B)右颈总动脉数字减影血管造影显示近端右大脑中动脉闭塞，通过ACA和PCA形成侧支循环。MCA区域动脉充盈延迟。(C)头顶显示器显示头皮上的浅表动脉（黄色）和浅表颞静脉（蓝色）。(D)头顶显示器显示配对的动脉和静脉，以指导高效安全地进行近端动脉分离。(E)额头显示器展示了侧裂沟解剖。根据位置和口径，在术前影像上识别并标记了候选受体血管（绿色）。(F)术后吲哚菁绿血管造影显示旁路通畅，近端大脑中动脉逆向充盈，远端大脑中动脉顺行血流。患者术后恢复良好，已出院回家。

模型和充分的认知准备，我们的增强现实工作流程有助于简化术中决策，并突出不确定区域。关于手术中注意力盲区的现有研究大多致力于描述意外术中发现未被注意到的频率。尽管这可能是手术理解的一个指标，但其他指标（如外科医生对关键解剖关系的理解）可能更为重要，最终对手术的成功影响更大。还有证据表明，注意力盲区对理解的影响程度可能受情况展示方式的影响。这表明，在增强现实开发中进一步研究分割模型和眼疲劳优化可能会减少这一现象的影响。

结论

神经导航和HUD的显微镜集成代表了图像引导手术的最新前沿，也是AR在神经外科中的实际应用。这些技术有可能改变手术体验，使外科医生能够充分利用术前检查结果。通过成功实施，AR能够提高手术效率、降低外科医生的认知负荷，从而减少外科医生疲劳。