

第十三章 未来前景

我们来到最后一章，该章将介绍一些可能影响未来广泛使用 VR 的主题，但目前还处于研究和开发阶段。第 13.1 和 13.2 节涵盖了我們忽略掉的感官。在前面章节，我们介绍了视觉，听觉和平衡（前庭）感觉，还剩下触觉，嗅觉和味觉。第 13.1 节涵盖触觉，或者更一般地说，体感系统。这包括刺激体感系统的生理学，感知和工程技术。第 13.2 节涵盖了两种化学感官，气味和味道，并试图为它们设计“呈现方式”。第 13.3 节讨论了如何使用机器人进行远程监控，以及它们最终如何成为我们的替代者，通过它们可以在 VR 界面探索现实世界。就像虚拟世界中的化身（10.4 节）一样，机器人在现实世界中变成一种物理化身。最后，第 13.4 节讨论了人类增强和交互的最终级别的步骤：脑机接口。

13.1 触觉和本体感受

视觉和听觉是 VR 系统的主要焦点，因为它们相对更容易使用现有技术进行捕捉。相应器官集中在头部的一个小地方，头部跟踪技术便宜而准确。不幸的是，这忽略了触觉和本体感受的强大感觉以及与我们周围世界密切相关的系统。我们的眼睛和耳朵使我们能够远距离感知世界，但触摸似乎让我们能够直接感受到它。此外，本体感受使身体感觉到世界上任何地方的重力以及肢体和其他可以被肌肉移动的结构相对位置或构型。因此，我们将考虑这些被忽视的感官，从它们的受体到感知，然后再考虑试图超越它们的工程系统。

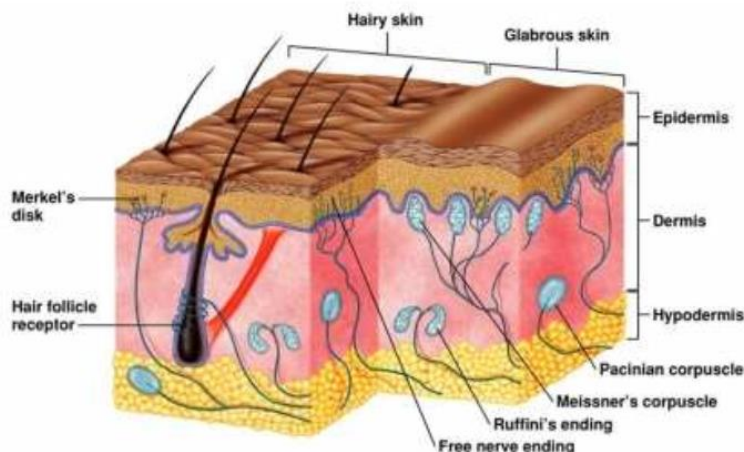


图 13.1 皮肤上的六种主要受体（图源于 Pearson Education）

躯体感觉系统

身体感觉向大脑提供关于人体本身的信号，包括与皮肤的直接接触，身体的构造和世界中的运动以及环境温度。在这一类别中，前庭系统（8.2 节）处理平衡，而躯体感觉系统处理触觉，本体感觉和动觉。考虑人体及其所有可移动部分，如腿，手臂，手指，舌头，嘴巴和嘴唇。本体感觉对应于每个部分相对于其他部分的姿势的意识，而动觉是运动本身的对应部分。换句话说，动觉提供速度，加速度和力量的信息。

躯体感觉系统至少有九种主要受体，其中六种用于触觉，其余三种用于本体感觉和动觉。图 13.1 描绘了嵌入皮肤（真皮）的六个主要触觉感受器。它们的名字，结构和功能是：

游离神经末梢：这些是没有专门结构的神经元。它们具有延伸到外皮（表皮）的轴突，其具有感测极端温度（热和冷）的主要功能以及来自组织损伤的疼痛。这些神经元是特殊的（称为假单极），因为轴突在典型的神经细胞中起到树突和轴突的作用。

鲁菲尼氏小体：它们深深地嵌入皮肤中，并指示随时发生的拉伸量。它们有一个缓慢的时间响应。

帕西尼安小球：这些小体充满液体并对压力做出反应。它们的响应速度很快，可以感应

高达 250 至 350 Hz 的振动（压力变化）。

梅克尔氏小盘：这些结构出现在表皮的正下方，并对静态压力作出反应（随时间变化很小或没有变化），并具有缓慢的时间响应。

迈斯纳氏小体：这些也只是在表皮下方，并且对轻微的触感作出反应。它们的反应速度比梅克尔氏小盘和鲁菲尼氏小体更快，可以感应到高达 30 到 50 赫兹的振动；这并不像帕西尼安小球那样高。

毛囊受体：这些对应于紧密缠绕在毛根周围的神经末梢；它们有助于轻微的触觉，并且如果毛发被移除也会造成疼痛。

这些受体的前四种出现在全身皮肤上。迈斯纳氏小体只在没有毛囊（*无毛的皮肤*）的部分，并且毛囊受体显然只出现在有毛的地方。在一些重要的地方，例如眼睑，嘴唇和舌头，称为 endbulbs of Krause 的热感受器也出现在皮肤中。另一类是 *痛觉感受器*，它出现在关节组织中，并引起过度伸展，损伤或炎症引起的疼痛感。

触摸具有空间和时间分辨率。空间分辨率或敏锐度对应于密度或每平方米面积的受体，其在身体上变化。指尖密度高，背部非常低。这对触摸感知有影响。时间分辨率与听觉不同，延伸至 20,000 Hz；帕西尼安小球可以将高达几百赫兹的振动与静态压力区分开来。

关于本体感觉（和动觉），有三种受体：

肌梭：顾名思义，它们嵌入每个肌肉的内部，因此它们长度的变化可以传递给中枢神经系统（包括大脑）。

高尔基腱器官：它们嵌入肌腱中，每个肌腱都是纤维组织的强韧带，通常将肌肉与骨骼连接起来。器官报告肌肉紧张度的变化。

关节感受器：它们位于骨骼之间的关节处，协助肌肉运动，同时还向中枢神经系统提供关于骨骼相对位置的信息。

通过这些受体，身体意识到其各种运动部件的相对位置，方向和速度。

体感系统的神经通路以类似于 5.2 节的视觉路径的方式工作。信号通过丘脑传送，相关信息最终到达大脑中主要的体感皮层，在那里进行更高级别的处理。早在丘脑之前，一些信号也通过脊髓传送到控制肌肉的运动神经元。这使得快速的运动反应能够迅速从疼痛刺激中退出，并且可以用于膝跳反射。在主体感皮层内部，神经元以其身体位置相对应的空间布置进行发射（地形图）。一些神经元也具有与皮肤上的局部斑块相对应的感受野，这与感受野对视觉的作用非常相似（回忆 5.2 节的图 5.8）。再一次，侧向抑制和空间对立性存在并形成检测器，估计沿着皮肤表面的尖锐压力特征。

体感知觉

我们现在从生理学转变为体感知觉。来自心理物理学的概念（2.3 节和 12.4 节）再次出现，导致确定检测阈值，感知的刺激强度，以及沿着时间轴和空间轴的敏锐度或分辨率。例如，在[26]中研究了以不同频率和温度呈现的振动存在的检测能力。

两点敏锐度

通过 *两点敏锐度测试* 研究空间分辨率，其中通过一对尖锐卡尺在附近两个地方戳皮肤。询问受试者是否在同一时间在不同的地方看到一次戳或两次戳。检测阈值然后由身体上的位置排列以理解空间分辨率如何变化。最敏锐的敏锐度在舌头和手上，如果它们接近 2 或 3 毫米，可以区分出点。舌头和手指的尖端具有最高的敏锐度。对于额头，门槛大约 20 毫米。背部的敏锐度最低，导致约 60mm 的阈值。这些结果也被证明与躯体感觉皮层中感受野的大小直接对应。例如，对应于背部的神经元比指尖具有更大的场（在皮肤面积方面）。

纹理感知

通过滑动手指，可以感应到表面的 *纹理感知* 结果。表面突出或凹面的小元素的大小，形状，排列和密度影响最终感知的纹理。双重理论指出，较粗糙的纹理（较大的元素）主要由

空间线索感知，而较精细的纹理主要通过时间线索感知[125,142]。通过空间提示，这意味着可以通过将手指按压在表面上来推断结构。通过时间提示，手指滑过表面，导致帕西尼亚和迈斯纳小体可以感知到的压力振动。对于更细的纹理，可能需要较慢的运动，以使振动频率保持在 250 至 350 Hz 以下。回想一下第 12.1 节，人们在阅读盲文时可以学会改善纹理感和敏锐度。因此，可以应用感知学习来改善触觉（触觉）感知。

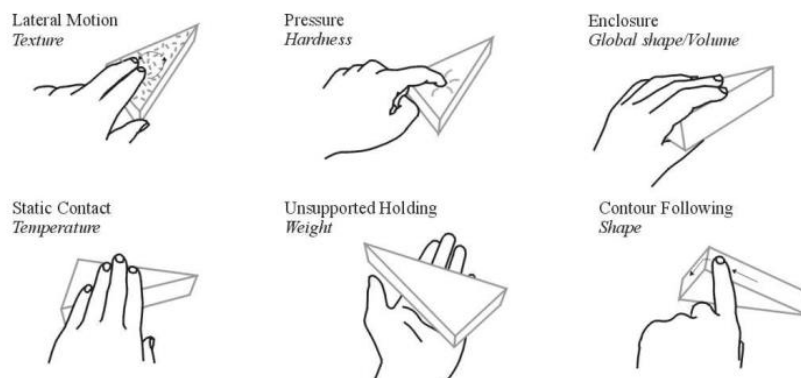


图 13.2 触觉探索涉及手和对象之间的几种不同类型的相互作用，以学习对象属性，例如大小，形状，重量，牢固度和表面纹理。

触觉感知

对于较大的物体，可以通过触觉探测来推断其整体几何形状，其涉及处理该物体。想象一下，有人给你一个未知的物体，并且你必须在蒙上眼睛时确定它的形状。图 13.2 显示了触觉探测的六种不同定性类型，其中每种都涉及不同类型的受体以及空间和时间信息的组合。通过整合这种手中操纵的体感信号，学习物体的几何模型。

体感幻觉

回想 6.4 节，大脑将多种感应模式中的信号相结合，以提供感知体验。正如麦格克效应使用视觉和听觉线索之间的不匹配性一样，幻象也被视觉和体感系统之间的线索不匹配所发现。橡胶手错觉是最广为人知的[66]之一。在这种情况下，科学家们进行了一项实验，让受试者坐在一张桌子上，双臂搁在桌子上。受试者的左臂被覆盖，但替代橡胶前臂被放置在桌子附近，并保持可见，使得它看起来好像是他们自己的左臂。实验者用油漆刷抚摸真实和假前臂，以帮助建立与假前臂的视觉和触觉关联。科学家使用功能性核磁共振成像扫描仪确定，无论是真实还是假前臂，大脑的相同部位都被激活。此外，他们甚至知道，用针做一个刺伤的手势会引起疼痛的预感和撤回没有受到威胁的真正左臂的倾向[66,293]，并且甚至可以通过一定的关联感知到冷热感觉[291]。

更一般地说，这被称为身体转移错觉[251,293]。在 1.2 节的图 1.14 中显示了一个 VR 系统的例子，其中男性和女性确信他们正在交换身体，而来自摄像机的视觉信息与协调的手部运动相结合以提供触觉感官刺激。这种现象的应用包括移情并帮助截肢者克服幻肢感。这种幻觉还可以通过控制肌肉，同时从 VR 获得视觉反馈，来深入了解可能学习的运动项目类型，如 10.1 节和 10.3 节所讨论的。它进一步影响了对 VR 中自我的感知，这在 10.4 节和 12.2 节中已经讨论过。



图 13.3 橡胶手错觉，其中一个人对假手作出反应，仿佛假手是她自己的。

触觉界面通过工程设备产生的触觉是通过许多不同的系统提供的。第 1.1 节的图 1.1 显示了一个系统，其中通过用户推动机械机翼飞行来提供力反馈。此外，风扇模拟强度与真实飞行人员速度成比例的风。整个身体也倾斜，以便提供适当的前庭刺激。

图 13.4 显示了几个更多的例子。图 13.4 (a) 显示了一个带有滚轮的 PC 鼠标。当用中指旋转轮子时，会感觉到离散的凸起，因此可以产生更仔细的校准运动。图 13.4 (b) 显示了一种游戏控制器附件，其在体验期间的关键点处提供振动，例如爆炸或身体接触。

许多触觉系统涉及使用机械臂在小区域内的精确位置和方向上施加力或压力。图 13.4 (c) 显示了这样一个系统，用户拿着一支连接在机器人手臂上的笔。力量从机器人传达到手指。当笔触击虚拟表面时，机器人通过阻止其运动向用户提供力反馈。笔可以拖过虚拟表面以感受任何类型的纹理[237]; [50]中介绍了各种模拟纹理。在医疗设备的开发中提供这样的力反馈是重要的，使得医生能够通过连接到真实设备的接口执行手术程序。如果没有准确和及时的触觉反馈，医生很难执行很多程序。

图 13.4 (d) 显示了一个类似于视觉显示的触觉显示。矩形区域通过行和列索引，并且在每个位置处可以迫使小销向外。这使得图形出现在表面，同时也允许各种水平的压力和频率的振动。

所有这些例子都涉及应用于手部的触觉反馈；然而，触觉受体出现在人体各处。为了提供对较大部分受体的刺激，可能需要触觉套装，其在套装上的各个点处提供力，振动或甚至电刺激。这些系统的缺点是在每次会话时穿上和脱下衣服都很麻烦。



图 13.4 (a) 具有滚轮的罗技 M325 无线鼠标, 当轮子执行完整的转动时, 提供 72 个凹凸形式的触觉反馈。(b) 世嘉 Dreamcast Jump Pack (1999), 附加到游戏控制器并在游戏过程中提供振动。(c) 触觉全指向笔触觉装置, 通过笔将手指压力和振动传达给手指。(d) KGS 点视模型 DV-2, 它是一个触觉引脚阵列。当指尖在其表面上扫描时, 引脚被强制向上以模拟各种纹理。

通过增强现实触摸反馈鉴于工程触觉显示器的困难, 另一种方法是依靠匹配区域中的真实物体向体感系统提供反馈。这有时被称为有形的用户界面[327]。如第 8.3.3 节所述, 通过调整真实世界和虚拟世界可以获得强大的体验。在极端情况下, 透明显示器(如 1.2 节中显示的 Microsoft HoloLens)使用户能够查看周围的物理世界并与其进行交互。显示器只是将虚拟物体添加到现实世界中, 或者直观地增强真实物体。这些系统通常包含在增强现实或混合现实中。

13.2 嗅觉和味觉

到目前为止, 没有考虑到的人类感觉就是嗅觉和味觉[65]。它们通常被归为化学感觉, 因为它们的受体通过与到达它们的分子发生化学相互作用而起作用。所产生的化学感受器对特定物质和足够高的浓度水平作出反应。与其他感官相比, 关于它们的研究少得多, 并且能“展示”鼻子和舌头刺激的电子设备也很少。尽管如此, 这些感觉是非常重要的。人造气味的设计是一项庞大的业务, 其中包括香水, 除臭剂, 空气清新剂, 清洁剂和熏香。同样, 设计品味是现代食品工业的基础(无论好坏)。

嗅觉生理学和感知

气味对于多种生物学的目的来说很重要, 包括寻找猎物, 选择潜在的配偶, 并判断食物是否能安全食用。嗅觉受体神经元位于鼻腔的顶部, 覆盖 2 至 4 平方厘米的面积。大约有 600 万个受体, 据说它们可以感受 500 到 1000 种不同的气味类型, 这取决于它们对特定化学成分的反应[204]。空气中的分子溶解到嗅觉粘液中, 便触发受感染纤毛(小毛发)的检测。嗅觉受体不断再生, 平均寿命约为 60 天。除了受体之外, 一些游离的神经末梢也位于嗅粘液中。感觉通路是不寻常的, 因为它们在达到它们的最高级别目的地之前不经过丘脑, 在嗅觉中被称为初级嗅觉皮层。从受体到杏仁核也有直接的路径, 这与情绪反应有关。这可能有助于解释嗅觉和情绪反应之间的密切联系。

就感知而言, 人类可以识别成千上万种不同的气味[286], 女性通常比男性表现得更好[36]。鉴别能力取决于气味的浓度(以每立方米面积的分子计)。如果浓度较弱, 则能力的差异程度下降。此外, 当一种气味被认为是高浓度的气味时, 对于另一种气味几乎不可检测到。因此, 检测阈值根据物质而变化千分之一或更多。适应气味也很重要。人们不断地适应周围的气味, 尤其是他们自己身体或家中的气味, 以使得它们变得不再明显。吸烟者也会采取适应措施, 以避免他们自己像非吸烟者那样感受到被污染的空气。

似乎人类可以识别比嗅觉受体数量更多的气味。因为编码的组合性, 这其实是可能的。任何单一的气味(或化合物)都可能引发多种受体。同样, 每个受体都可能被多种气味触发。因此, 气味与受体之间存在多对多映射。这便能够根据被激活的受体类型的不同亚组区分出更多的气味。

嗅觉相关问题

给电影“添加香味”可以追溯到 20 世纪初。从 1960 年开始, 一种系统被称为“气味 O 型视觉”开始使用, 其在电影中的不同时间点将 30 种不同的气味注入电影院座位。1.3 节图 1.28 (c) 中提到的 Sensorama 系统也包含了气味。此外, 军队几十年来一直使用气味作为模拟器的一部分。

曾经的一次嗅觉呈现调查显示在[136]中, 其中也提到了当前的挑战和问题。人们普遍认为, 嗅觉能够增加 VR 中的沉浸感。它还在某些涉及情绪反应的医疗治疗中有一定的优势。更令人惊讶的是, 最近有证据表明宜人的气味有助于减少视觉诱发的晕动症[147]。

嗅觉显示设备通常涉及可将化合物喷洒到空气中的气泵。这种气味的呈现可以通过靠近人的鼻子来完成。在这种情况下，设备可以穿在身上[356]。最新研发的一个系统如图 13.5 所示。又或者，这些气味可以根据房间的比例进行释放和散播。对于 CAVE 设置来说，这将是优选的，但通常很难控制气味的强度和均匀性，特别是从打开的窗户和通气孔中产生的气流。此外，可能还需要调整大面积上的气味浓度以便进行定位，但这又难以准确实现。

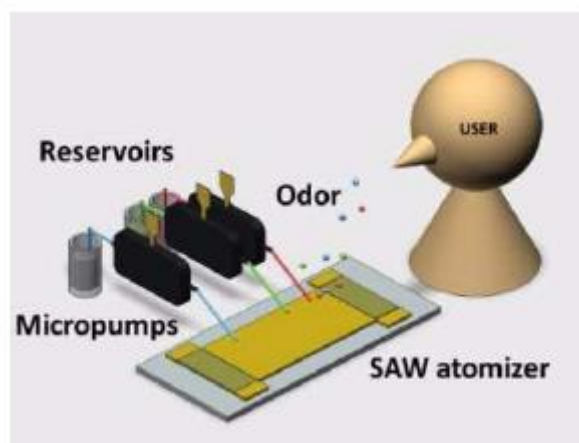


图 13.5：来自[114]的可穿戴嗅觉呈现设备的描述。微型泵迫使小型储液器排出液体。SAW 雾化器是一种将液滴转化为雾化气味的表面声波装置。

味觉和感知

我们现在从嗅觉转换到味觉。在人类的舌头上，大约有 10,000 个味蕾，每个味蕾包含一组约 50 至 150 个味觉受体[295]。受体平均存活 10 天，并不断再生。目前，已经确定的五种基本类型的味觉受体为：

- 鲜味 (Umami)：这种味道对氨基酸敏感，如味精（味精），承担对总体味道感知的工作。这使得食品制造商能够以低成本地添加使食物味道更好的化学品。生物学原因可能是因为氨基酸是蛋白质的重要组成部分。
- 甜味：这对于根据糖含量来确定食物来源非常有用。
- 咸味：这对于确定食物来源是否具有足够的盐含量是非常有用的，对于正常的神经功能是必需的。
- 酸味：这对确定食物中的酸量很有用，包含有益的维生素，未成熟，甚至变质食物中的细菌。
- 苦味：这通常与有毒植物有关，可能会引发人们对它们的厌恶。

所有这些工作通过溶解食物并基于化学分解产生响应。感觉通路通过丘脑连接到味觉皮层和杏仁核，从而影响情绪反应。

味觉感受与味觉受体类型密切相关。最广为人知的模型之一是 1927 年开始的 Henning 四面体，它是一个具有三个维度的味道，它是使用重心坐标（第 7.2 节）在四个极端顶点上生成的，每个顶点代表纯甜，咸，酸或苦。因此，每个味道都是一个具有四元素的线性插值。这其中忽略了鲜味，它是最近才被添加到受体类型列表中的[43,228]。适应性在口味上也会产生，包括对可能导致恶心的食物。滋味的概念是一种将味觉，嗅觉，温度，触觉，视觉和声音提示相结合的感性体验。因此，理解创造滋味体验的机制是具有挑战性的[57]。

味觉刺激



图 13.6: 电子棒棒糖是在新加坡国立大学开发的[260]。

迄今为止，以电子方式模拟味道的做法相对较少。图 13.6 显示了一个最近的例子，其中电极放置在舌下以模拟主要味道类型的刺激。在另一项工作中，品尝幻觉是通过伴随不正确的视觉和嗅觉线索进食而形成的[226]。VR 的味觉界面通常很难开发，因为实际上并没有让人们在体验中吃东西。除此之外，显然还有健康和卫生问题。

13.3 机器人接口

机器人是可编程设备，涉及传感器，执行器（电机）和计算设备的结合。它们通常被期望来解释高层命令，使用传感器了解周围的世界，并计划并执行使他们安全的行动，以实现其控制者制定的目标。它们的组件从多种形式上都模仿了人体的结构组成。机器人有传感器，人类有感官。对于某些特定的对应关系，机器人具有摄像头，IMU 和关节编码器，而人类则通过视觉，前庭和本体感受来测量相似的物理量。大多数机器人都有电动机，人类都有肌肉，两者都有相同的用途。机器人执行计算以将高级别目标与低级别电机命令相关联，同时解释来自传感器的数据。人类对高层次目标的处理过程也是如此，同时向肌肉发送运动信号并将感官刺激转化为感知现象。在对机器人和人类进行了很多比较之后，便产生一个问题就是：为什么不使用 VR 技术让人类能够栖身于机器人的身体？我们可以使用机器人作为我们自己的替身。

远距离操作

实现这一愿景的第一步是与机器人进行远距离互动。一个多世纪以来，车辆已经可以由遥控操作。最早的例子之一是 1898 年在尼古拉特斯拉在纽约公开展示的无线电控制船。在 20 世纪，许多远程操控机器人被开发用于远程或危险情况下的导航，例如处理放射性材料，太空旅行，海底探险。航天机构（如美国航天局）和军方对遥控车进行了广泛的研究和开发。遥控操作的另一个有趣的例子是 1995 年的 TeleGarden，它是一个机器人手臂，悬停在南加州大学的一个真正的花园上，与互联网连接。远程访客可以种植种子，或照顾花园。2001 年，遥控机器人被部署到世界贸易中心的轰炸现场搜寻遇难者。目前，各种遥控车辆已被广泛应用，包括汽车，固定翼飞机，四旋翼飞机（无人驾驶飞机），船只和潜艇。遥控操作通常是比较困难的，因为用户必须在处理控制器时从第三人称视角控制车辆。因此，许多车辆已经配备有无线摄像机，使得用户在屏幕上获得第一人称视角（FPV）。这是迈向网真的重要一步。遥控操作不仅限于车辆。卫生保健是遥操作领域中最大且不断增长的领域之一，其通常涉及操纵医疗仪器的固定式机器人手臂。有关网络机器人的调查，请参见[300]。

现代机器人

目前已经有成千上万种不同的机器人被设计和制造，其中一些具有特殊用途，例如在建筑物外面清洁窗户，另一些则用于更普通的目的，例如辅助生活。图 13.7 显示了具有拟人化或“类人”外观的人形机器人。图 13.8 显示了其他类型机器人的样品。1.2 节中的图 1.11 展示了另外两个例子，它们是立体云台模块和视频流无人机。



图 13.7: 由日本国立先进工业科学技术研究所 (AIST) 和 Kawada Industries 在日本生产的 HRP-4 仿人机器人。

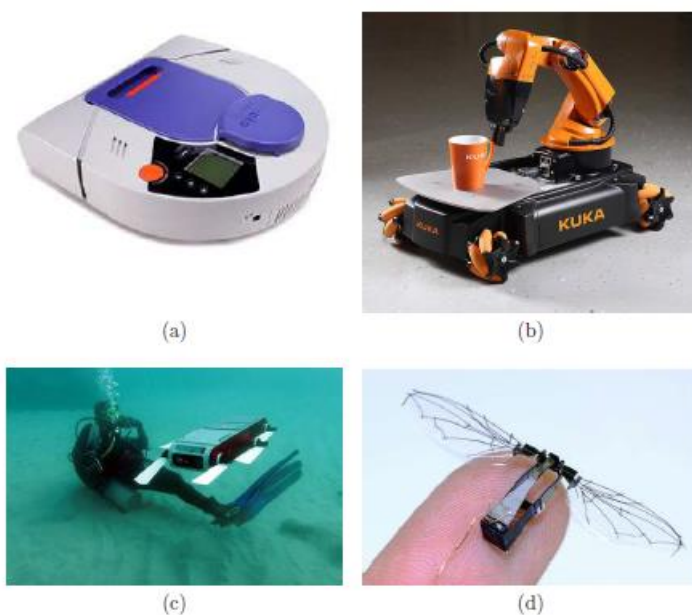


图 13.8: 商业和大学机器人样本: (a) Neato XV 真空清洁机器人。(b) Kuka YouBot, 这是一个全方位的移动模块, 顶部有一个机械臂。(c) Aqua, 一种来自 McGill 大学的水下机器人[64]。(d) 哈佛大学飞行的微型机器人[190]。

除了硬件之外, 还有大量的软件基础设施可以帮助开发人员, 如 ROS (机器人操作系统) 和 Gazebo。几乎所有的机器人都有可以连接遥控机器人 VR 接口的候选平台。摄像机和麦克风充当用户的替代眼睛和耳朵。在可实现并且对于具体应用来说比较重要的条件下, 夹具 (也称为末端执行器) 可以用作远程手。用户可以通过键盘, 控制器, 声音或身体动作来指挥机器人的动作。对于类人机器人, 甚至可以使用动作捕捉 (第 9.4 节) 跟踪人体, 并直接映射到人形机器人的运动。更一般地说, 机器人的任何拟人化方面都可能成为匹配区域的一部分。另一方面, 机器人允许许多非人类的体验, 例如变成小昆虫, 在房间里飞行, 或者像海中的鱼一样游泳。

远程呈现

远程呈现的术语和概念归功于人工智能的先驱 Marvin Minsky [213];另见[265,287,310]。对于最理想化的情况（用现有技术远远无法实现），它可以完全消除实际旅行的需要。它也可能导致因残疾或高龄流动性受限的人的生活发生革命性变化。在技术挑战方面，网真涉及两部分的整合：遥控操作和 VR。

图 13.9 显示了一个市售的远程呈现系统，并作为一个有用的参考点。远程呈现研究中出现了类似的机器人[137,172,243,319]。机器人由用户通过平板电脑或智能手机控制，而在远程地点，机器人携带平板电脑，提供广角相机和屏幕以显示用户的脸部。底座设计用于在典型的办公室空间中滚动，并且平板电脑高度可调，以实现面对面的互动。这个设备是“头重脚轻”的，这便可以通过倒立摆来稳定平板电脑。



图 13.9: Double telepresence 机器人是一个手柄上的屏幕和摄像头。该机器人的成本约为 2500 美元，屏幕是平板电脑，如 iPad。高度甚至可以远程调整，以使其看起来像坐着或站立着。

关于远程呈现机器人，有几个方面可以想到：

感官输入：来自远程物理世界的感觉是什么？对于视觉输入，它可能包含直接映射眼睛视点并且甚至与用户头部运动匹配的相机（如图 1.11（a）所示）。或者，它可以捕捉并传输整个全景图。更进一步，这可以延伸到深度和光场。使用一个或多个麦克风捕获听觉输入，具体取决于本地化的重要性。远程呈现的其他一些可能的输入是温度，接触力，湿度，气味以及机器人的剩余电池寿命。

移动性：机器人在哪里？在没有移动性的情况下，网真被简化为固定的摄像头和麦克风。如果任务是与人互动，那么它应该能够移动到人们能够进入的相同位置。在其他情况下，可能需要许多移动模式，例如飞行，游泳，甚至通过管道爬行。

视听输出：在某种极端情况下，网真系统可能看起来像是“在墙上飞”，并且不会干扰远程地点的生活。更常见的是，它被设计为与人互动，这可以通过屏幕和扬声器来完成。如果机器人具有一些拟人化特征，那么它也可以制作与其他人交流情感或意图的手势。

操纵：图 13.9 所示的远程呈现系统面向面对面交互，因此忽略了能够操纵远程站点上的对象。远程呈现机器人如果能抓住，操纵，携带和取消对象，则功能更加强大。然后，它可以打开门，操作电梯，购物，等等。

本节的其余部分涵盖了开发更好的远程呈现系统方面的持续挑战。

机器代理问题

想象一下，人们会如何对自己的机器人做出反应。他们很可能不会像对待正常人地一样对待机器人。回想第 10.4 节，VR 中的社交互动取决于人们选择代表自己的化身。使用远程呈现，你就会被视为机器人化身，这会导致相同类型的社交问题[242]。这个不寻常的形象可

能看起来有些残缺或尴尬，导致他人回避互动。不幸的是，与纯虚拟世界中的交互相比，选择自己想要看到的方式的自由性要少得多。如果是在公共平台上，你可能不得不被大家认为是尴尬的。社交机器人和人机交互研究可能有助于通过这种机器人化身来改善社交互动[81,129,274]。

远程控制 vs 自动化

假设机器人可能在比匹配区域更大的区域漫游，那它就需要一种移动方法。这意味着用户应通过一个接口控制机器人的运动。在 10.2 节中，运动被提出用于在大型虚拟世界中进行导航，并被解释为控制一辆大车的行为（图 10.5）。现实世界中机器人的行为几乎与纯虚拟世界中的大车类似；然而，仍存在一些区别：1）机器人不能轻松地传送到另一个地点。但是，如果有很多可用的机器人，则可以连接到不同的机器人，这会感觉像传送给其他用户一样。2）机器人根据其物理设计和环境受到限制。它可能有滚轮或步行腿，可能或不可能轻易地穿越部分环境。它也具有有限的行驶速度，转弯速度和电池寿命。3）机器人撞击到人或障碍物通常会消耗大量成本。

对于远程操控机器人的用户，存在一系列选择。在一个极端情况下，用户可以连续控制运动，就像使用遥控器驱动无线电遥控车一样。延迟在一些应用中变得非常重要，特别是远程手术[188,355]。另一方面，用户可以简单地在地图上指出位置或使用虚拟激光指示器（第 10.2 节）指向可见位置。在这种情况下，机器人可以并带着用户一起自主执行所有的动作。这要求机器人具有更高的自主性，因为它必须规划自己的路线，以实现目标而不会遇到障碍；这在机器人学中被称为*运动规划*[163]。这使用户可以不用将注意力集中在机器人移动上，但是对于机器人平台和环境的某些组合下，可能难以获得可靠的性能。

虚拟现实不适问题

由于与运动的关系，虚拟现实给人带来移动感觉的认知因素(vection)再次出现（8.4 节）。第 10.2 节中提到的许多建议可用于减少这种因素，例如在机器人移动时降低对比度或视野。现在考虑一些特定于机器人的建议。用户可能会觉得自己控制机器人更舒适，而不是让机器人提高自主性，尽管它涉及到长时间乏味的专注过程。此外，通过运动规划算法确定的路径本身可以通过缩短发生加速的时间或通过避免靠近具有高空间频率和对比度的墙壁或对象来优化以减少不适。另一个想法是在机器人移动时，从第三人称视角在 2D 或 3D 地图上显示动作。当机器人在移动时，任何东西可以想象性地被呈现给用户，例如新闻馈送。就虚拟世界的运动而言，必须注意不要因为未能提供相对于旧的位置和方向足够的信息，来在用户抵达前简单推断新的位置，而让用户感到迷惑。

延迟问题

如预期的那样，时间延迟威胁到网真系统的性能和舒适度。这种延迟已经在视觉渲染（7.4 节）和虚拟世界模拟（8.3.2 节）方面进行了讨论。网络系统会导致新的延迟被添加到 VR 系统，因为信息必须从客户端传输到服务器并再次返回。此外，带宽（位每秒）有所限制，这可能会导致进一步的延迟或质量下降。作为参考，2012 年谷歌的平均返程时间约为 100 毫秒（美国为 50 至 60 毫秒）[219]。请注意，通过向用户传输整个全景视图，网络延迟不应影响头部跟踪和渲染延迟。

然而，延迟对交互性有重大影响，这对网络游戏玩家来说是一个众所周知的问题。另一方面，人们发现，在抱怨交谈困难之前，人们通常可以容忍长达 200 毫秒的电话延迟；然而，如果他们期望机器人立即回应他们的移动命令，就有可能感到沮丧。由于手眼协调的延迟，完成一个操控任务将会更加困难。在某些情况下，假设延迟在试验期间没有显着变化[68]，人们可以通过适应来克服高延迟。延迟对远程医疗应用提出了相当大的挑战。想象一下，如果你是一位通过网真系统推动手术刀的医生，但在 500 毫秒期间内都看不到或感觉不到是否该停止切割。这可能太晚了！

13.4 人脑-机器接口

人类和机器之间的最终界面可以通过直接感知和刺激神经元实现。向这个方向迈出的第一步是提取第 12.3 节介绍的生理学测量。我们可以利用诸如心率，电流皮肤反应和苍白程度来动态调整 VR 体验，而不是用它们来研究 VR 不适。各种目标将得到优化，例如兴奋，恐惧，舒适或放松。进一步来看，我们可以应用读取神经元激活的技术，以便 VR 系统通过改变视觉和听觉显示来响应它。用户可以了解到某些想法在虚拟现实中具有相应的效果，从而进行精神控制。神经可塑性和知觉学习的能力（第 12.1 节）可以使他们在虚拟世界中舒适有效地移动他们的虚拟身体。这可能听起来像科幻小说，但已取得实质性进展。例如，最近，杜克大学的神经科学家们开始训练猴子驾驶轮椅，仅使用他们的想法 [259]。在人脑-机器接口领域（或者 BMI，人脑-电脑接口或 BCI），已经进行了许多其他的实验，他们通过自己的想法将人和动物连接到机械系统和 VR 体验 [173,175,185]。这方面的调查包括 [89,232,351]。

测量方法

测量神经活动的设备的目标是破译用户的意图和决定。它们通常分为两类：非侵入性（允许将传感器接触皮肤）和侵入性（允许钻入颅骨）。

首先考虑非侵入性情况，这是迄今为止最适合人类的情况。迄今为止测量全脑活动最准确的方法是通过功能磁共振成像（fMRI），如图 13.10 所示。这与大多数人熟悉的 MRI 作为常用的医学扫描方法有关。普通 MRI 的不同之处在于它提供了静态结构的图像来识别异常，而功能磁共振成像提供的图像显示了部分大脑随时间的活动。不幸的是，fMRI 作为 VR 接口的日常使用速度太慢，昂贵且麻烦 [173]。此外，用户通常会摄入一种染料，这种染料会增加由于血流量变化造成的对比度，并且必须保持固定。

因此，测量 BMI 的大脑活动的最常用方法是通过脑电图（EEG），其包括沿着头皮放置电极以测量源于神经活动的电场波动；见图 13.11。不幸的是，由于大脑组织，骨骼和皮肤有效地进行低通滤波，破坏大部分信号导致信噪比很低，对其他神经结构也有显著的衰减和干扰。通过 EEG 的信息传输速率在每秒 5 到 25 比特之间 [173,351]。这大约相当于每秒几个字符，比平均打字速度慢两个数量级。从 EEG 信号中提取信息涉及困难的信号处理 [278]；已经存在开源库，例如 INRIA Rennes 的 OpenVibe。

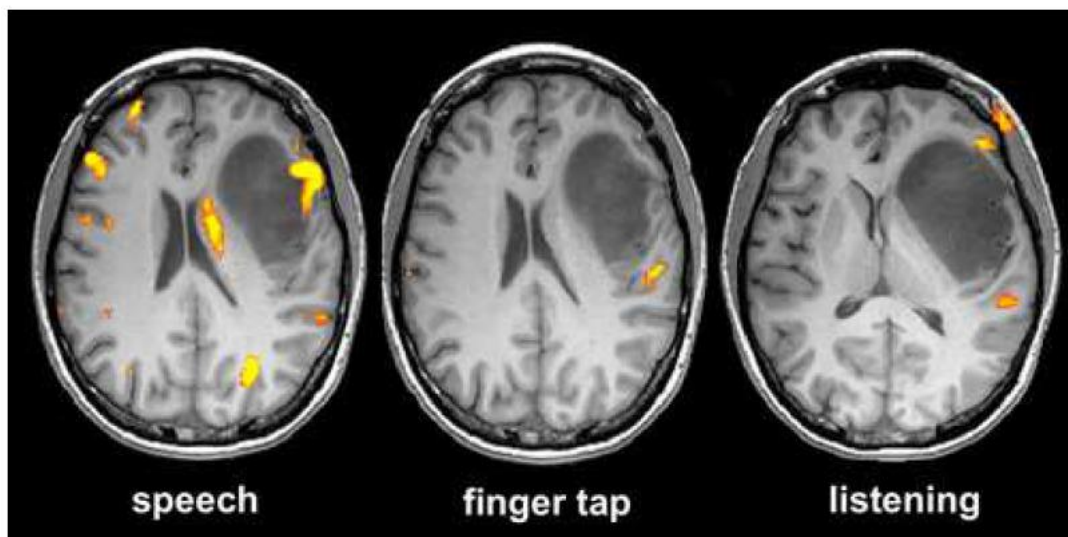


图 13.10：基于各种活动的 fMRI 扫描。（图源 Mayfield 的脑和脊椎）

对于侵入性病例，电极植入颅内（骨骼内）。这为科学家提供了更多的信息，但仅限于研究动物（以及一些患有帕金森病等神经疾病的人）。因此，侵入性方法不适合绝大多数人

作为 VR 接口。最简单的情况是为一个特定的神经元执行一个单位的记录; 然而, 这往往会增加所需试验的次数, 因为神经反应通常在不同试验中的不同神经元之间切换。随着神经元数量的增加, 破译想法的问题变得更加可靠。许多记录可能来自执行已知功能的单个站点, 或可能来自多个帮助理解大脑执行的分布式处理的站点 [173]。



图 13.11: EEG 系统将电极放置在颅骨周围:

(a) 一个颅骨帽, 可以测量几十个信号。 (b) 无线情绪式 EEG 设备。

医疗目的

了解 VR 用户与 BMI 的主要群体之间的差异非常重要。BMI 领域发展迅速, 因为它可能给患有神经肌肉残疾的人带来可移动性[351]。例如控制轮椅和仅利用思想移动假肢。第一个精神控制系统是由 Jacques Vidal 在 20 世纪 70 年代[331,332]建立的, 从那时起许多系统都使用几种神经信号建立起来了。在所有情况下, 操作这些接口都需要大量的训练和技能。作为治疗过程的一部分, 运动障碍患者可能会有很强烈的动机利用日常时间进行训练, 但大多数 VR 用户不会这样做。训练中一个有趣的问题是用户需要反馈, 这才是 VR 的完美应用。VR 系统中的控制器基本上被分析神经信号的处理系统的输出所取代。因此, 用户可以在接收来自 VR 系统的视觉反馈的同时练习移动虚拟轮椅或假肢。这可以防止他们在练习时伤害自己或损坏设备。

学习新的身体模式

当控制假肢时, 人类对自己身体感知时会发生什么? 身体内部的大脑表征被称为身体模式。这在一个世纪以前被提出[115], 当人们巧妙地使用工具时, 身体模式会相应地适应, 以便大脑感到有新的扩展身体在运作。这导致工具和手的感知同化, 这已经从[131]中的神经信号得到证实。这为 VR 研究提出了一个耐人寻味的问题: 我们的大脑通过不同的视觉身体表征(虚拟身体)以及运动和操纵的相互作用机制可以学习什么样的身体模式?

VR 中的 BMI

在 VR 的背景下, 大多数系统使用三种不同类型的 EEG 信号中的一种 [84,174,185,186,270]: 1) 运动图像, 2) SSVEP, 3) P300。最常见的是运动图像, 这是一个人在执行动作之前发生的心理过程。在此期间, 人们会排练或模拟大脑中的运动, 从而导致主要运动皮质中可测量的激活。用户可以想象旋转到位或在脚步中实现虚拟世界中的移动。不幸的是, 大多数成功的系统仅限于一些简单的命令, 例如开始和停止步行。尽管如此, 用户已经可以通过简单地想象动作去探索迷宫般的环境。

运动图像的一个优点是它确实需要来自系统的任何干扰或特殊刺激, 从而允许用户在没有中断或特定计时的情况下继续进行。不幸的是另外两种信号需要产生刺激, 然后通过 EEG

测量响应。其中之一是 SSVEP（稳态视觉诱发电位），当闪烁的视觉刺激呈现在 3.5 至 75Hz 范围内时发生。SSVEP 的信噪比非常高，用户可以通过对闪光的关注程度来影响结果。是否专注的决定被用作命令的基础。另一个信号是 P300，在出现罕见且相关的刺激后约 300ms 出现。这里再重复一次，它基于用户对刺激的关注程度来测量响应。

研究挑战

尽管 BMI 正在迅速成熟，但在能够广泛使用之前仍存在一些挑战：

- 保持非侵入性的测量神经信号的更好技术。理想情况下，人们希望测量数千个具有高信噪比的神经元的输出。功能磁共振成像近年来备受关注的一种替代方法是功能近红外光谱（fNIRS）。这些信号可以与 EEG 结合使用以增强测量[134,227]。

- 用户可以指定的每秒多比特改进带宽，因此与利用身体动作或控制器相比，具有明显的优势。具有非侵入性 BMI 的 VR 系统通常每秒只提供一位，这是非常不足的[175]。

- 更好的分类技术，可以以更高的准确性和细节识别用户的意图和决定。现代机器学习方法可能有助于推动这一点。

- 在使用接口之前，大幅减少所需的训练量。如果相比于学习打字，它需要更多的工作量，那么就不太可能得到广泛应用。

- 更好地理解通过 VR 系统提供的反馈可以学习什么样的身体模式，以便大脑自然地接受虚拟身体。

因此，除了帮助患有运动障碍的人外，BMI 在达到科幻小说预期的精神控制水平之前还有很长的路要走。

大脑中的又一个“大脑”

为了建立一个广泛的，网络化的 VR 社会，在遥远的未来很容易考虑侵入性 BMI 的可能性。在继续推进之前，回顾第 12.4 节中对道德标准的讨论，并考虑这样的未来是否可取。假设除了测量神经输出，直接神经刺激也被使用。这将不需要在感官面前放置显示器。对于眼睛，信号可以直接发送到光感受器。这种技术被称为视网膜植入，并且已经存在来帮助盲人。同样，人工耳蜗可以帮助聋人听到东西。神经科学家们，例如斯坦福大学的 David Eagleman，甚至提议我们可以学习开发全新的感官。一个例子是通过将它们频率，振幅和空间安排重新映射到身体上的其他集合体（如背部）来感知红外或无线电信号。神经可塑性的限制尚未完全被这样理解。

不考虑刺激受体，工程刺激甚至可以放在更高的神经水平。例如，如果可以直接刺激视神经，为什么还要刺激光感受器呢？这涉及到模拟神经节细胞进行的处理，这是具有挑战性的，但与刺激杆和锥体相比也会降低带宽要求。最终，直接的神经测量和刺激可能导致大脑中的又一个“大脑”，这在 1.1 节中已经提到。

大脑中是否还有一个“大脑”呢，我们不得而知。实际上，在这本 VR 书时，还有许多谜底等待着被揭晓。