MindSculpt：利用脑机接口使设计师通过思考创建多样几何体

Qi Yang[1], Jesus G. Cruz-Garza[2], Saleh Kalantari[*]

摘要

MindSculpt 使用户能够仅通过思考这些几何体，实时在 Grasshopper 中生成各种混合几何体。这一设计工具将脑机接口（BCI）与参数化设计平台 Grasshopper 相结合，创建出直观的设计工作流。与基于鼠标键盘范式的传统计算机辅助设计工具相比，该工作流缩短了从构思到实施之间的延迟。该项目源于神经科学与建筑学之间的跨学科研究，旨在构建一种人机协作工具，使其能够利用设计过程中思维的复杂性与流动性。

MindSculpt 采用基于支持向量机模型（SVM）的监督式机器学习方法，用于识别参与者在脑海中旋转四种不同实体几何体时，脑电图数据中出现的脑电波模式。研究人员邀请没有设计经验的参与者对 MindSculpt 进行了测试，发现该工具使用起来颇具趣味，并有助于设计构思和艺术创作。

关键词：脑机接口、设计工具、直观交互、设计认知、人工智能、机器学习

1. 引言

Abraham Maslow 被认为提出了“工具定律”，这一观点通常概括为：“如果你手里只有一把锤子，那么一切看起来都像钉子”（Maslow 1966，第15页）。这句话提醒我们，在设计中所使用的工具必然会影响我们的感知和工作流程，从而参与塑造最终的设计产品。在功能强大的计算机出现之前，Antoni Gaudí 和 Frei Otto 等设计师开发了物理原型制作工具，以帮助他们更好地将脑海中逐渐成形的复杂形态可视化。这些工具的主要用途是提供及时反馈，使设计师能够评估自己的构想并加以改进。随着计算机时代的发展，基于WIMP范式（窗口、图标、菜单和指针）的设计工作流程成为新的标准（Caetano等，2020；Shanker等，2014）。这些工具旨在为没有编程背景的人提供更直观的技术界面（Sutherland 1964）。然而，多项实证研究表明，使用基于WIMP的计算机辅助设计工具可能会妨碍设计构思和概念设计过程。与传统的草图绘制相比，基于WIMP的设计已被证明会抑制多样化想法的产生（Stones等，2007；Alcaide-Marzal等，2013），误导设计师过度关注细节而忽视

整体情况。（Ibrahim等，2010；Charlesworth 和 Chris，2007），并且由于界面不直观，促使设计过早固着，限制设计师的能力（Robertson 和 Radcliffe，2009）。

一些研究人员提出了合理的理论和原则，以开发能够更好地支持设计创造力的工具（Hutchins等，1985；Shneiderman等，2006）。例如，根据Hutchins的直接操控理论，设计工具应力求缩小“执行鸿沟”，即计算机用户必须将意图转换为机器可理解的线性、顺序指令时所产生的心理距离或延迟。执行鸿沟过大，会导致创意生成与实现之间的延迟增高，从而打断直观的可视化和设计反馈过程。基于WIMP的设计工具的主要问题之一是其执行鸿沟相对较大，对于尚未完全熟练掌握相关软件和输入技术的用户而言尤其如此。

为了解决基于WIMP的计算机界面在设计构思阶段存在的不足，我们开发了MindSculpt。这款新型设计工具可将用户对不同形态的想象直接转换为常用设计软件平台中的高保真实时数字原型，无需指向和点击（图1）。MindSculpt基于一种机器学习算法，该算法经过训练，能够识别与用户对不同实体几何体的可视化相关的脑信号。这项技术仍在开发中，当前生成的结果相当灵活，有时也难以控制，反映了思维本身的复杂性。尽管如此，总体而言，测试参与者的反馈相当积极，表明MindSculpt在设计构思中的应用潜力巨大。

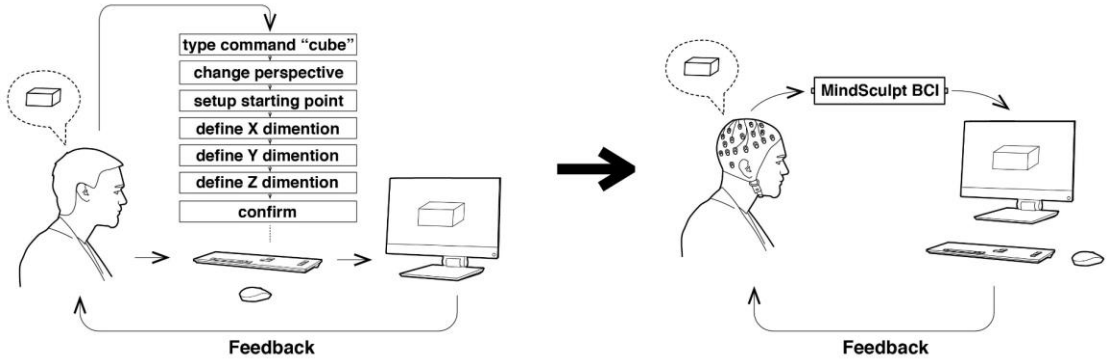
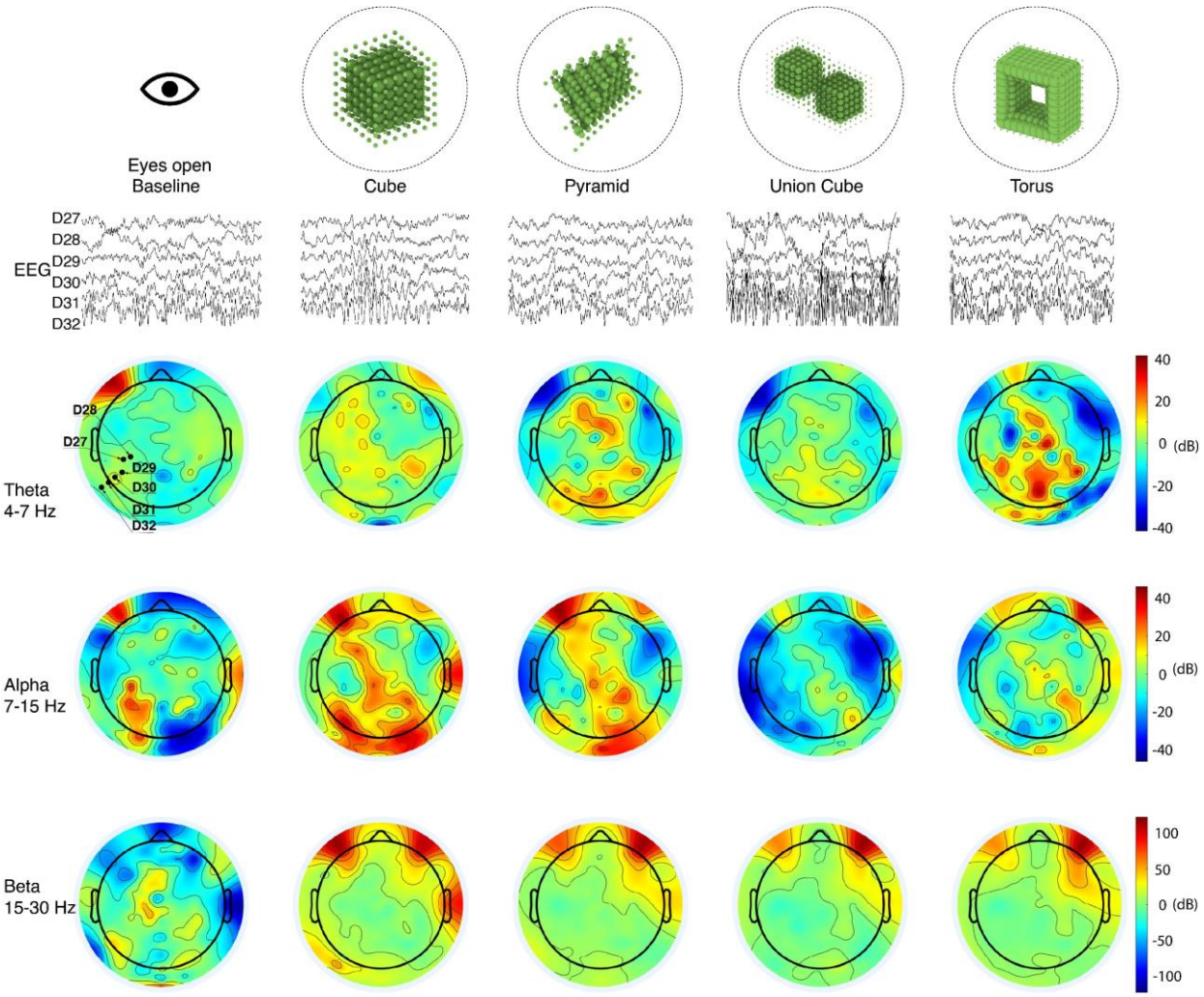


图 1。 传统计算机辅助设计工具反馈回路与 MindSculpt 反馈回路的比较 .

2. 背景

脑机接口（BCI）能够将用户的脑活动转化为信息或指令（Lotte等，2018）。此前的研究已证明，可以对与复杂几何体和形状的心理意象相关的脑电信号进行分类（Esfahani等，2012；Rai和Akshay，2016）。此外，物体的心理旋转已成为脑机接口领域常用的一项任务，可用于展示该技术在二元分类场景中的潜力（Friedrich等，2013；Jeunet等，2015）。心理旋转可以适应更广泛的任务难度，并在使用脑机接口时为用户提供更多灵活性

（Gardony等，2017）。尽管大多数脑机接口应用都面向临床场景，尤其是身体残障人士（Abiri等，2019），但研究人员也探索了脑机接口技术在艺术与设计领域的应用（Nijholt，2019，第104–111页）。例如，早期一项研究中，研究人员利用脑活动控制一组机器人，创作了一件艺术装置（Ulrike，1991）。其他研究则让用户能够利用脑信号创作数字绘画、控制面板运动或构建数字模型（Barsan-Pipu，2019；Kübler等，2019；Shanker等，2014；Todd等，2019；Wulff-Abramsson等，2019；Herrera-Arcos等，2019）。Kovacevic及其同事（2015）



同时采集了20位参与者的脑信号，并利用这些数据操控环境室内空间，将其作为一种沉浸式艺术形式。

图2. 参与者1在对每个几何体进行心理旋转时对应的不同脑模式。

在许多此类研究中，脑机接口应用能够生成引人入胜的脑信号外部可视化，并可定制用户心理意象

与输出之间的关系。然而，与各种脑机接口输出相关联的脑活动类型往往只是间接相关，甚至有悖直觉。有一种系统将眨眼等运动活动映射为“画一个圆”等指令（Shanker等，2014）。另一种系统通过让图标闪烁，解码用户关注的位置（Kübler等，2019）。还有一项探索利用脑活动来评估并影响自主生成的设计，而非对其进行主动、动态的控制（Barsan-Pipu，2019）。在这里，我们为用户提供一种体验：借助脑机接口，在几何形体的构思与其外部呈现之间建立直观、即时的反馈回路。

MindSculpt 项目采用机器学习方法，识别与不同实体几何体的心理意象相关的神经信号，然后通过常用设计软件在屏幕上呈现相同的几何体（图2）。在构思和概念设计阶段，离散分类范式似乎不足以满足设计探索的需求。在 MindSculpt 中，用户生成的动态形状由脑机接口经过训练识别的各个组成实体形状组合而成；这种方式既利用了离散分类范式的能力（即针对四种形状训练脑机接口），又能提供不断演变的输出（图3）。

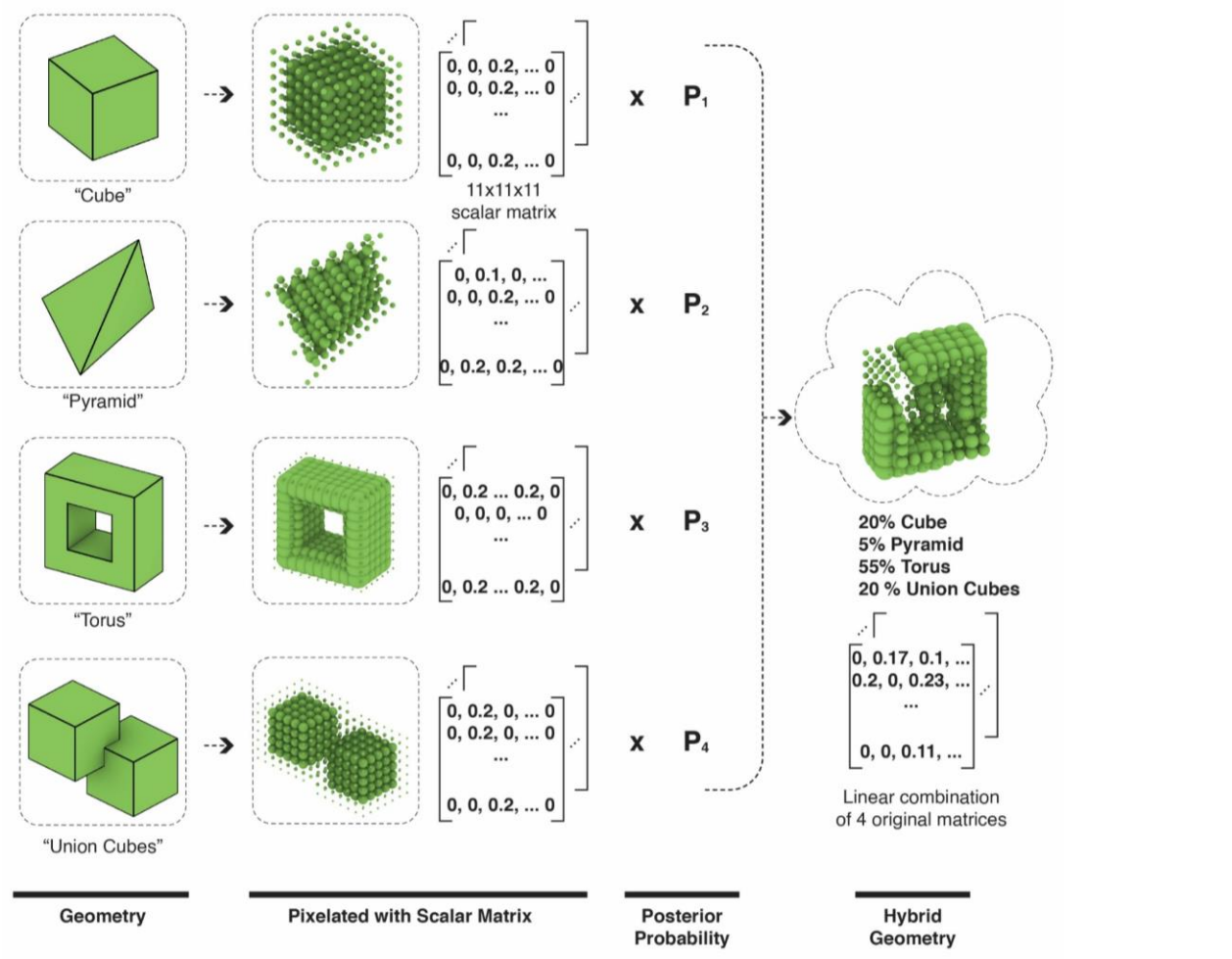


图 3. 利用后验概率进行几何生成，从而实现混合图形的创建。

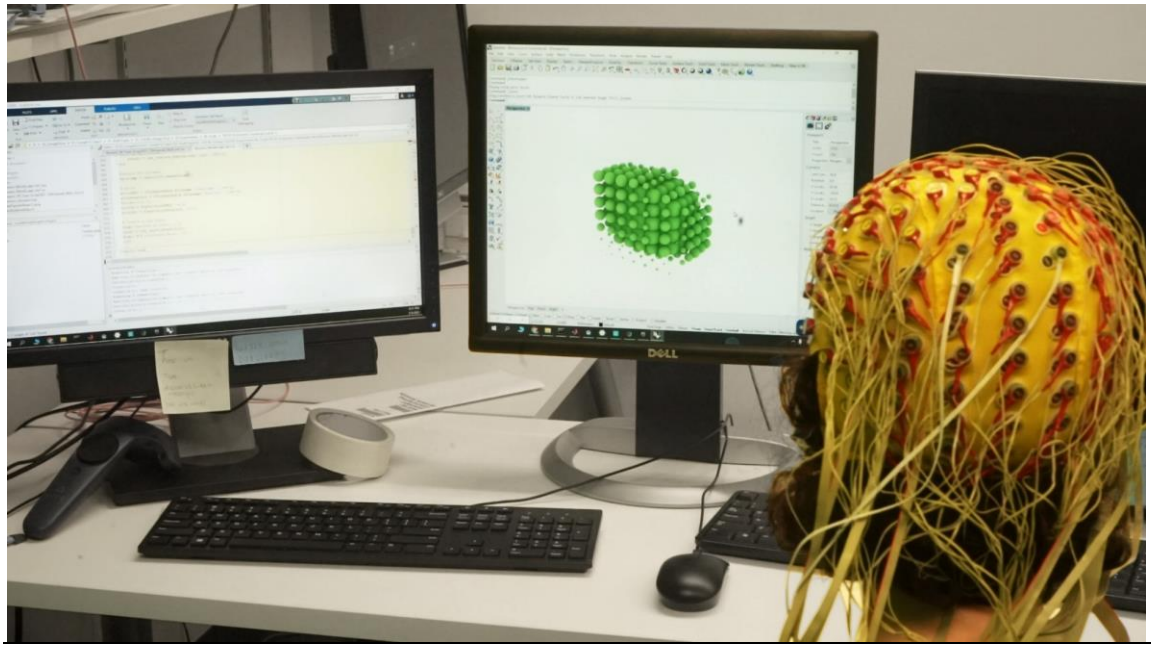
MindSculpt 采用的方法是将机器学习模型的输出设为后验概率分数，并根据该概率分数对三维几何体进行像素化。后验概率指的是模型为一个新数据样本属于其训练所用各类别标签中的每一类所分配的概率。因此，MindSculpt 能够生成丰富多样的复杂几何体，超越用于训练机器学习模型的四种基本形状。例如，当用户在构思过程中犹豫该选择立方体还是棱锥时，MindSculpt 会流畅地生成一种介于立方体与棱锥之间的新颖混合几何体（图3）。

3. 方法

在 MindSculpt 项目期间，研究人员首先确定了创建脑机接口的最佳方法，随后与非设计师参与者开展了一项试点研究，以测试该系统。

3.1. 硬件和软件配置

MindSculpt 当前的配置包括脑电图头戴设备、Openvibe（Renard等，2010）、Matlab 和 Grasshopper（图4）。脑电图数据通过非侵入式、128通道、凝胶式 Actiview系统（BioSemi公司，阿姆斯特丹，荷兰）及银/氯化银有源电极采集。Openvibe 是一个开源脑机接口平台，可实时采集脑电图数据，并通过实验室流传输层将结果传输至 Matlab（Kothe等，2014）。Matlab 用于对脑电图数据进行预处理、训练参与者特定机器学习模型、预测用户随后可视化的几何体，并以用户数据报协议（UDP）格式将目标类别的后验概率分数发送至 Grasshopper。Grasshopper 的功能



使我们能够编写不同的几何生成算法，并实时向用户展示结果。

图 4. 一位参与者使用 MindSculpt 进行构思的实验场景。

3.2. MindSculpt 工作流程

使用 MindSculpt 分为三个阶段（图 5）：首先，为参与者戴上脑电帽，并讲解心理旋转；随后，参与者进行为时 5 分钟的训练环节，再完成额外 5 分钟的机器学习环节，使脑机接口能够评估其个人神经反应；最后，参与者便可实时自由使用该工具。先前研究表明，脑机接口自我调节会受到心理因素的影响，包括用户在该次环节中体验到的认知状态（例如动机、专注和心流），以及测量时间等外部因素（Roc 等，2020）。这些因素可能会影响不同参与者在不同环节中对同一抽象物体的脑电数据中的心象表征。因此，我们为每位参与者构建了个性化的机器学习模型（Shah 等，2021；Wang 等，2021）。训练环节旨在针对不同用户校准脑机接口并优化其性能。

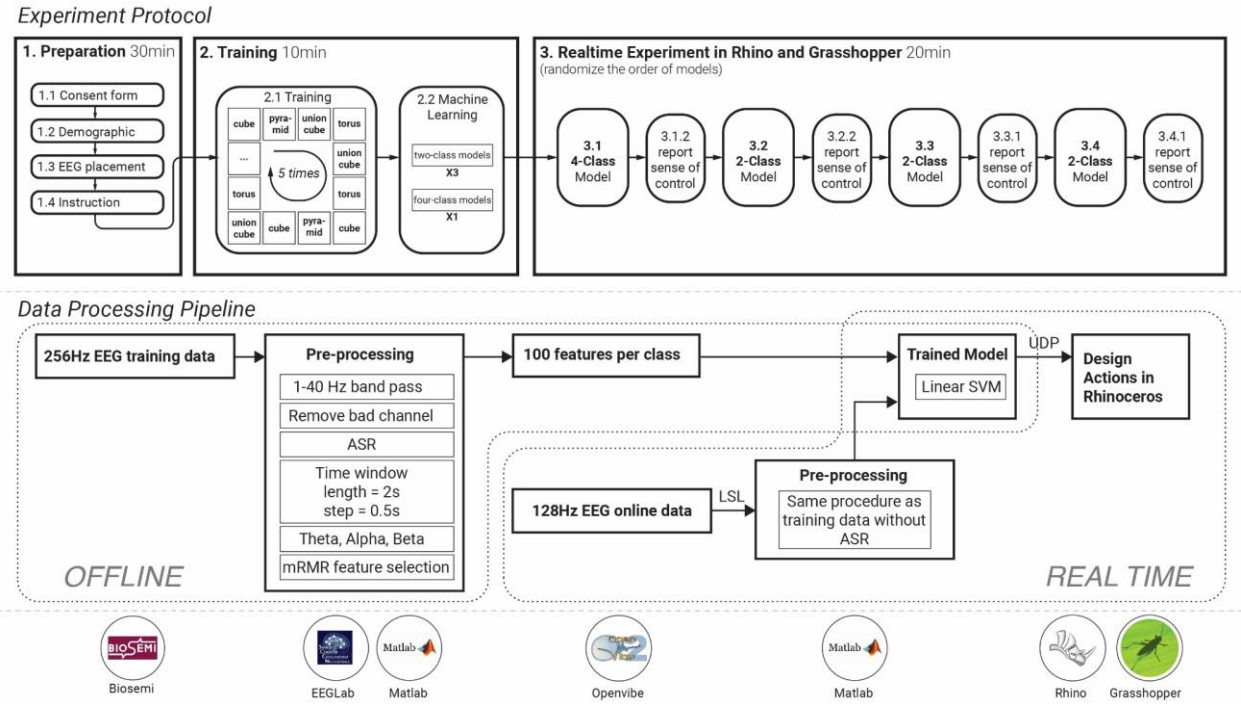
在此环节中，参与者观看了一段视频，视频中四种预先选定的几何体以随机顺序依次出现在电脑屏幕上，每种显示10秒。这些几何体分别为立方体、棱锥、方形环面，以及两个沿对角线组合的立方体（“并集立方体”）。每当任一几何体出现时，用户都会被要求在脑海中对图像进行旋转，这有助于形成对该图形强烈的心理意象（Friedrich et al. 2013年）。这一过程持续进行，直到每个图形均显示五次。

参与者观看并在脑海中对这些实体几何体进行可视化时，以256 Hz记录脑电图数据。训练环节结束时，对这些数据进行处理，并在Matlab中通过机器学习流程（图5）。为获得所需频段（1~40 Hz），首先对原始脑电数据进行预处理和带通滤波，并移除与头皮接触不良的坏通道。我们采用伪迹子空间重建（Mullen et al. 2013年）来移除噪声通道和伪迹性功率突发（标准差阈值为= 15）。随后，我们通过目视检查，移除由眨眼、咬紧牙关和身体动作等运动伪迹引起的脑电尖峰，因为这些会干扰机器学习模型对不同几何体心理旋转的类别判定。

对于 128 个脑电图通道中的每一个，我们以 0.5 秒为步长，在每个 2 秒的数据窗口中提取三个频段的功率。选取的频段为 θ波（4-7 Hz）、α波（7-15 Hz）和 β波（15-30 Hz）。

我们使用最小冗余最大相关（mRMR）（Peng 等，2005年）算法，从384个特征中筛选出最显著的特征（图7）。我们将所选特征的最小数量设定为16，以提高后续实时性能的鲁棒性，因为在实时情况下，任何通道的数据都可能受到不可预测事件的影响，例如用户的剧烈动作。随后，MindSculpt 使用这些数据训练支持向量机模型（SVM），基于与四种几何体各自相关的脑活动，为每位参与者创建独特的专属模型。

此时，参与者可以开始使用 MindSculpt 实时可视化混合形状。在我们的试点研究中，参与者被要求可视化样本几何形状的两类别组合。这些组合包括 [立方体 + 棱锥], [并集 立方体 + 环面], 以及 [棱锥 +并集 立方体]。参与者还被要求可视化一种四类别组合，即将所有样本几何形状组合起来以创建最终形状。他们被告知可以按自己的意愿创建这些混合几何体，但鼓励他们考虑对样本形状进行心理旋转和合并，并且每个混合几何体至少操作3分钟。经训练的机器学习模型则会为这四种预定义几何体分配权重，该权重与某一数据样本属于各类别的后验概率成正比。由脑电图数据导出的混合几何体通过 Grasshopper 在电脑屏幕上实时呈现（图5）。如果用户喜欢该设计，他们可以按下按钮暂停接收脑数据并保存显示的几何体。随后，他们可以使用同一按钮恢复数据接收和实时可视化，继续探索自己对系统的心理控制。实验结束后，研究人员进行了简短的半结构化总结访谈，以获取每位参与者对 MindSculpt 系统性能的反馈。



Fi图 5. MindSculpt 的实验方案与数据处理流程。

3.3. 参与者 可行性研究

在试点研究中，我们采用便利抽样法（口耳相传及在院系邮件列表上发布公告）招募了七名参与者。这些参与者此前均未在设计领域工作或学习，也没有脑机接口使用经验。他们都是本科大学生。每位参与者在参加实验前都签署了知情书面同意书，整体研究方案也已获得批准

，并由机构审查委员会在研究活动开始前审查通过。所有实验环节均在同一地点进行。

4. 结果

在试点研究的七位参与者中，对于训练集二分类模型，我们取得了 82% 的平均分类准确率（标准差 = 4%，n = 7）；通过迭代地使用 4 次试验训练线性支持向量机分类器，并将 1 次试验作为验证集，离线验证准确率的平均值为 78% （标准差 =3%，n = 7 ）（图 6 ）。

我们还请参与者按照 1（低）到 10（高）的量表，自我报告他们对所呈现混合几何体的控制感。收集到了 7 位参与者中 5 位的数据。尽管有些参与者表示使用 MindSculpt 时控制感较强，但我们观察到二分类模型的感知表现差异很大（最小值 = 1.67，最大值 = 7.3，均值 = 4.93，标准差 = 2.29，n = 5）。本研究中自我报告表现的高方差与此前脑机接口研究的观察结果一致（Jeunet等，2015）。

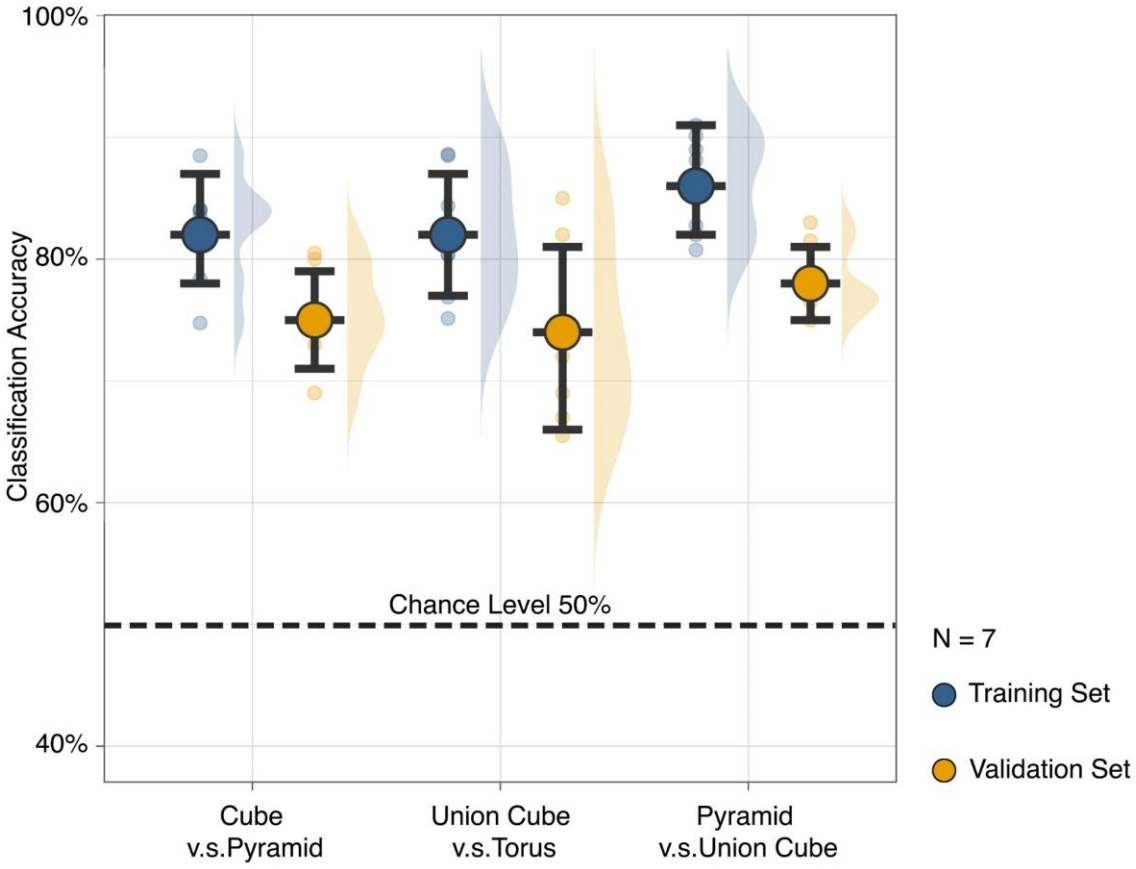


图 6. 三种二分类模型的分类准确率和验证准确率。

对于简单几何体（立方体、棱锥），在头皮额部和后部区域观察到更多 α波功率；而对于更复杂的几何体（并集、环面），则观察到抑制（图

2）。这些观察结果与先前的研究发现相呼应（Michel等，1994年；Riečanský等，2010年；Gardony等，2017）。就选取的脑电图特征而言，所有二分类模型平均选取了 23 个特征（标准差 = 6.83，n = 21）。特征选择结果显示，选取 17 至 23 个特征后，验证准确率趋于稳定（或有所下降）。更多特征可能会损害实时性能。不同参与者的各模型所选特征各不相同（图 7），但均构成了一个由额区、中央区和顶区组成的网络。

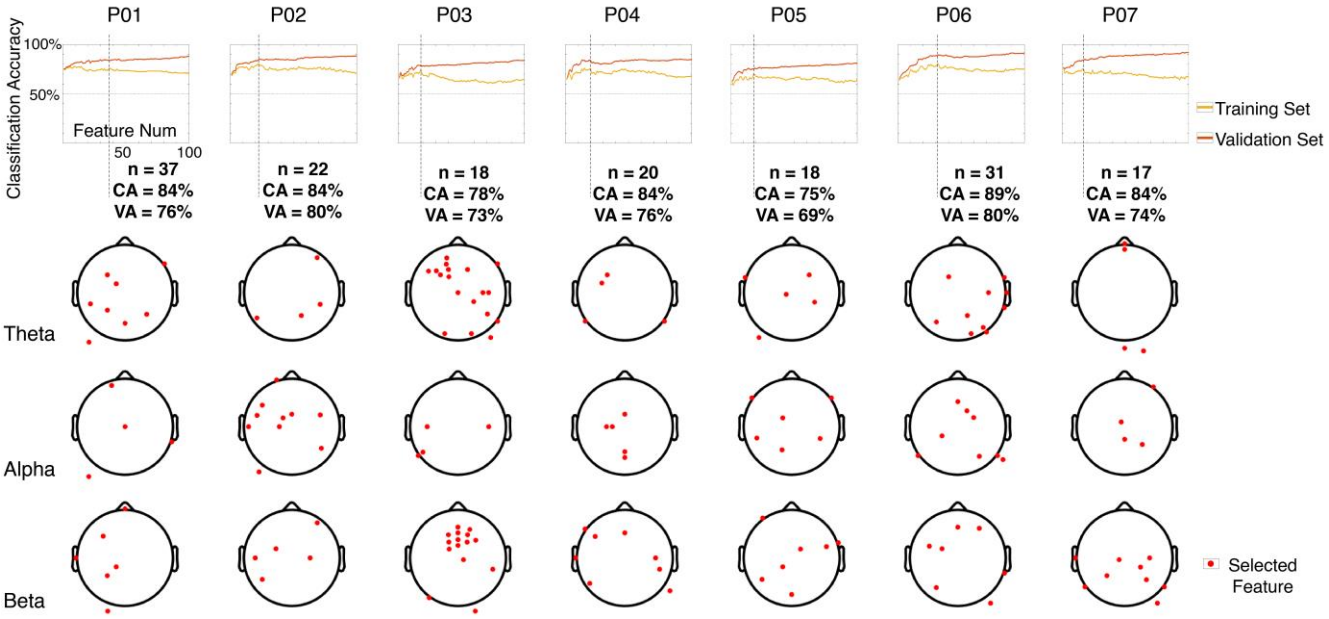


图 7. 特征　　基于立方体与棱锥模式的 mRMR，为所有参与者进行特征选择　　I.

使用 mRMR 得到的、与分类最相关的特征显示，当参与者对复杂程度不同的几何体进行心理旋转时，各通道的相关性呈现出不同模式（图 7）。在 α频段（8-12 Hz）中，中央区（靠近运动区）的相关性始终最高、冗余度最低，因此最能预测心理意象；不过，电极的空间分布范围较广。θ波（4-7 Hz）和 β波（15-30 Hz）频段也为分类表现提供了相关信息，其中包括位于额叶中线区和顶叶区的相关通道（Gardony等，2017）。

对这七位参与者进行的用户测试带来了令人鼓舞的反馈。实验过程中，我们注意到，几乎所有参与者都愿意花远超规定的 3 分钟的时间来探索每种混合形状。有三位参与者表示，他们有动力尝试心理旋转和组合以外的不同思路来生成几何体。例如，一位参与者尝试思考矩形物体，并测试立方体能否相应地拉伸。

在访谈中，所有参与者都称这款工具“富有创意”且“有趣”。他们表示，这款工具激发了他们探索不同形状的动力，并认为即时的实时反馈有助于他们的思考过程。然而，一位参与者提到，一边关注屏幕上不断变化的实时反馈，一边专注于内部视觉化，对他们而言很困难

。一位参与者表示，他更喜欢闭上眼睛思考，再短暂睁开眼睛查看结果。五位参与者表示，持续专注于几何形状令他们感到困难且心理负荷较高。当被明确问及 MindSculpt 脑机接口与传统的基于WIMP的计算机辅助设计之间的关系时，三位参与者表示，未来应该同时采用这两种技术。当被问及 MindSculpt 的局限性时，最常见的担忧是，脑机接口无法准确地将用户的心理模型清晰呈现在屏幕上。当基于脑电图的表示在相当长一段时间内似乎未能符合参与者的意图时，三位参与者感到困惑、沮丧或恼火。我们甚至观察到一位参与者责怪自己思考得不够努力，尽管这并非参与者的过错。

5. 讨论与结论

本文将一种新型交互方式——脑机接口引入建筑设计领域，并探讨其在设计构思中的潜力。不同于以往的脑机接口应用（Shanker等，2014；Kübler等，2019），MindSculpt是首个面向建筑形态生成构思阶段设计师的脑机接口应用，能够将用户意图直接匹配为相应的视觉反馈，旨在最大限度地缩小执行鸿沟（Hutchins等，1985）。本研究通过128通道脑电图头戴设备记录参与者的脑活动，并开发机器语言分类器，以反映用户对实体几何体进行心理旋转的过程。在此前利用心理意象任务对不同几何体进行分类的研究（Esfahani等，2012）的基础上，MindSculpt展示了一种新颖的替代方法：通过让用户执行心理旋转任务，对复杂程度不同的几何体进行分类。

为测试该界面的性能，我们对 7 位参与者开展了一项可行性研究。结果表明，这种人机交互方式具有很大的潜力，但当用户因指令而感到困惑、不确定该想象什么，或在训练环节中分心时，系统的可靠性会下降。

使用脑机接口对设计师的优势在于，它能够提供一种更直观、实时的计算机辅助设计机制，促进认知加工，尤其是在产品开发的设计构思阶段。由于目前几乎所有其他人机交互方法都受限于 WIMP模型（Kerous、Skola和Liarokapis，2018年），因此，MindSculpt 这类基于脑机接口的方法有望彻底改变主流设计实践。MindSculpt 旨在缩短从设计构思到设计实施的反馈回路，使从业者能够即时获得高保真反馈，并对其想法进行外部可视化和记录。试点研究中的研究人员观察结果和参与者反馈表明，这种方法能够立即激发用户在给定的可能性空间中探索多种设计方案。目前的概念验证研究展现了 MindSculpt 方法的价值，并为探索更复杂的设计情境以及用户与系统之间的长期交互奠定了基础。我们相信，MindSculpt 为脑机接口在设计研究与实践中的应用开辟了令人振奋的新途径。

5.1. 局限性

目前，MindSculpt 受限于其几何生成算法。尽管四种几何形体的线性组合能够产生许多引人入胜的结果（图 8），但增加基础形状的数量，将使系统能够更贴近地生成建筑设计师希望探索的各种几何形体。还需要进一步研究，以确定用户脑模式每天可能出现多大程度的变化，以及 MindSculpt 能否适应这些变化并随着时间推移更好地适应用户。最后，目前的试点研究主要依靠用户反馈来评估该工具的可行性。用户对 MindSculpt 的积极反响以及使用意愿充分体现了该系统的潜力，但仍需进一步研究客观指标，例如用户草图之间的视觉相似度、MindSculpt 输出的数量与多样性，以及将 MindSculpt 整合到实际设计工作流程中的实用效果。

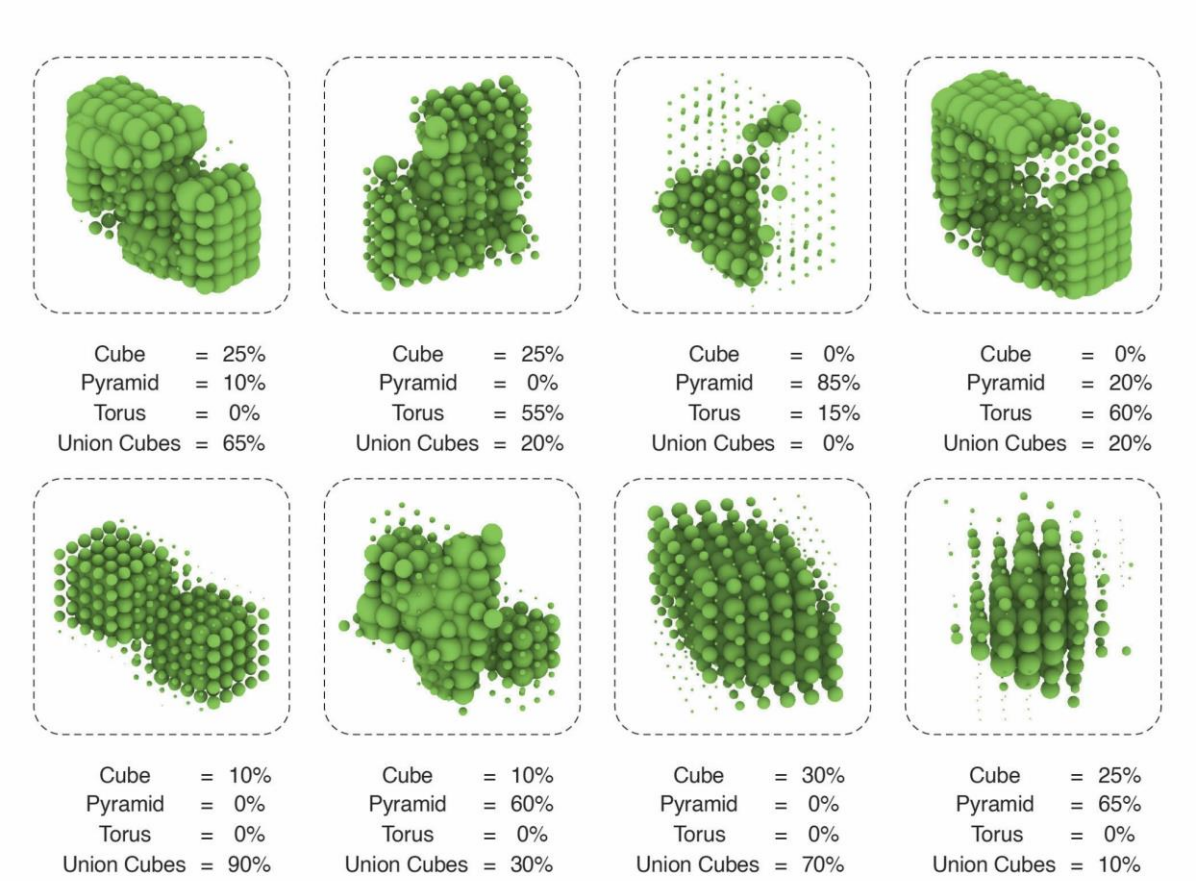


图 8. MindSculpt生成的各种几何体。

5.2. 未来方向

为了拓展 MindSculpt 的可能设计空间，我们期待开展更多基础研究，帮助我们理解包括但不限于脑电图在内的生理指标与设计意图之间的关联。

尽管 MindSculpt 为设计领域提供了一种令人着迷的新型脑机接口方式，但传统的鼠标和键盘模式，以及传统的草图绘制和原型制作方式，不太可能很快消失。设计领域未来最可能的发展方向，是将脑机接口与这些更传统的交互方式结合起来。因此，该领域的未来研究需要评估脑机接口在设计过程中的最佳用途。哪些设计任务最适合通过脑机接口完成？又该如何将这些交互方式的使用和输出，最佳地融入工作流程的其他环节？解决这一问题的一种思路，或许可以从脑机接口目前的优势中找到：它能对二元操作提供高度的控制力和精确度。研究人员可以考虑将脑机接口映射到操控形体的指令上。例如，可通过脑机接口在“布尔并集”和“布尔差集”之间进行选择，同时使用其他交互方式进行“选择”或“更改位置”。

在设计过程中出现错误，以及设计成果未能符合最初意图的情况，都是意料之中的。然而，当这种情况发生时，设计师需要能够及时纠正这些错误，或发现其中蕴含的新方向。本研究的参与者表示，当 MindSculpt 系统的结果偏离其意图且无法轻易调整到一致时，他们会感到有些沮丧。未来该领域的研究将受益于对系统中的错误纠正和非脑机接口反馈问题展开调查。另一个相关问题是脑机接口工具陡峭的学习曲线，这应通过编写清晰的指南和开发交互式教程加以解决（Lotte 和 Camille，2015年）。

该领域未来的研究人员还可以更加密切地关注被动脑机接口、反应式脑机接口和主动式脑机接口这几种范式（Nijholt，2019，第5—7页）。反应式脑机接口要求用户关注某种刺激（例如显示模型中闪烁的片段），以选择并修改相应区域。这类脑机接口具有更高的准确性，但涉及的自主思考较少。被动脑机接口会监测用户的脑电波，并根据压力水平等指标触发特定操作。尽管这些范式并不完全属于“通过主动思考来完成”，但它们可能具有应用于设计的潜力。例如，可以设想利用被动脑机接口评估并校准由主动式脑机接口生成的设计选项，比如让用户挫败感的增加触发系统响应方式的转变。至于主动式脑机接口，将其他类型的神经信号纳入系统响应中也存在许多潜在机会。与各种身体动作甚至情绪感受相关的脑信号，都可以用于创造富有启发性的设计过程。未来的研究人员还应更加明确地关注基于脑机接口的工具对于患有运动障碍或在使用传统基于WIMP的计算机界面方面存在其他限制的设计师的价值。特别关注这一群体，将为评估和改进该技术的整体实用性提供机会，并有助于扩大其应用范围。

参考文献

Abiri, Reza, Soheil Borhani, Eric W. Sellers, Yang Jiang, and 赵晓鹏. “基于脑电图的脑机接口范式综合综述。”《神经工程学杂志》16, no. 1 (2019年): 011001.

Alcaide-Marzal, Jorge, José Antonio Diego-Más, Sabina Asensio-Cuesta, and Betina Piqueras- Fiszman. “数字雕刻在概念产品设计中的应用探索性研究。”Design Studies 34, no. 2 (2013年): 264-284. Barsan-Pipu, Claudiu. “在虚拟现实中，人工智能结合眼动追踪和神经反馈，用于计算机辅助建筑概念设计中的脑机接口。”载于《计算设计与机器人制造国际会议论文集》，第124-135页。施普林格，新加坡，2019年。Caetano, Inês, and António Leitão. “建筑与计算相遇：建筑计算设计方法演进概述。”Architectural Science Review 63, no. 2 (2020年): 165-174. Charlesworth, Chris. “学生在设计开发中对虚拟建模和实体建模的运用——三维设计教育中的一项实验。”The Design Journal 10, no. 1 (2007年): 35-45. Dong, Enzeng, Changhai Li, Liting Li, Shengzhi Du, Abdelkader Nasreddine Belkacem, and Chao Chen. “一种用于脑机接口的全新分层支持向量机算法：多类别运动想象分类。”Medical & Biological Engineering & Computing 55, no. 10 (2017): 1809-1818. Esfahani, Ehsan Tarkesh, and V. Sundararajan. “利用脑机接口对基本形状进行分类。”《计算机辅助设计》44, no. 10 (2012): 1011-1019. Friedrich, Elisabeth VC, Christa Neuper, and Reinhold Scherer. “因人而异，行之有效：系统化以用户为中心的训练方案，优化脑机接口。”PLoS ONE 8, no. 9 (2013): e76214. Gardony, Aaron L., Marianna D. Eddy, Tad T. Brunyé, and Holly A. Taylor. “脑电频谱功率揭示心理旋转任务中的认知策略。”Brain and Cognition 118 (2017): 1-18. Herrera-Arcos, Guillermo, and Daniel Pimentel. “运动中的媒介化相互依存：协作式增强现实（AR）与脑机接口（BCI）装置。”载于《移动脑体成像与艺术、创新和创造力神经科学》，第189-194页。施普林格，Cham，2019年。Hutchins, Edwin L., James D. Hollan, and Donald A. Norman. “直接操纵界面。”Human–computer Interaction 1, no. 4 (1985): 311-338. Kerous, Bojan, Filip Skola, and Fotis Liarokapis. “基于脑电图的脑机接口与电子游戏：进展报告。”Virtual Reality 22, no. 2 (2018): 119-135. Kothe, C., D. Medine, and M. Grivich. “实验室流传输层（2014）。”URL: https://github.com/sccn/labstreaminglayer (2020). Kovacevic, Natasha, Petra Ritter, William Tays, Sylvain Moreno, and Anthony Randal McIntosh. “‘我的虚拟梦境’：沉浸式艺术环境中的集体神经反馈。”PLoS ONE 10, no. 7 (2015): e0130129.

Kübler, Andrea, 和 Loic Botrel。“脑绘画的诞生——从构想到闭锁综合征患者的日常应用。”载于《脑艺术》，第 409-431 页。施普林格，Cham，2019年。Ibrahim, Rahinah, 和 Farzad Pour Rahimian。“用于建筑设计教学的计算机辅助设计与手绘工具比较。”《Automation in Construction》19，第 8 期（2010年）：978-987。Jeunet, Camille, Bernard N’Kaoua, Sriram Subramanian, Martin Hachet, 和 Fabien Lotte。“根据人格、认知特征和神经生理模式预测基于心理意象的脑机接口性能。”PLoS ONE 10, 第 12 期（2015年）：e0143962。Lotte, Fabien, Chang S. Nam, 和 Anton Nijholt。“引言：脑机接口的演进。”载于《脑机接口手册：技术与理论进展》，第 1-11 页。Taylor & Francis（CRC Press），2018年。Lotte, Fabien, 和 Camille Jeunet。“基于人类学习原理改进脑机接口。”载于第三届脑机接口国际冬季会议，第 1-4 页。IEEE，2015年。Maslow, Abraham H.《科学心理学：初探》，第 15 页。Harper & Row，1966年。Michel, Christoph M., Lloyd Kaufman, 和 Samuel J. Williamson。“脑电图和脑磁图α抑制的持续时间随心理旋转任务中的角度增大而延长。”《认知神经科学杂志》6，第 2 期（1994年）：139-150。Mullen, T., Kothe, C., Chi, Y.M., Ojeda, A., Kerth, T., Makeig, S., Cauwenberghs, G. 和 Jung, T.P., 2013年7月。使用可穿戴脑电图实时建模并三维可视化源动态与连接性。载于2013年第35届IEEE生物医学工程学会年会国际会议（EMBC）（第 2184-2187 页）。IEEE。Nijholt, Anton，编。《脑艺术：用于艺术表达的脑机接口》。Cham：施普林格，2019年。Peng, Hanchuan, Fuhui Long, 和 Chris Ding。“基于最大依赖、最大相关性和最小冗余互信息准则的特征选择。”《IEEE模式分析与机器智能汇刊》27，第 8 期（2005年）：1226-1238。Rai, Rahul, 和 Akshay V. Deshpande。“碎片形状识别：一项脑机接口研究。”《计算机辅助设计》71（2016年）：51-64。Renard, Yann, Fabien Lotte, Guillaume Gibert, Marco Congedo, Emmanuel Maby, Vincent Delannoy, Olivier Bertrand, 和 Anatole Lécuyer。“Openvibe：用于在真实与虚拟环境中设计、测试和使用脑机接口的开源软件平台。”《Presence》19，第 1 期（2010年）：35-53。Riečanský, Igor, 和 Stanislav Katina。“诱发的脑电图α振荡与心理旋转能力相关：神经效率和串行处理的证据。”《神经科学快报》482，第 2 期（2010年）：133-136。Robertson, B. F., 和 D. F. Radcliffe。“计算机辅助设计工具对工程设计中创造性问题解决的影响。”《计算机辅助设计》41，第 3 期（2009年）：136-146。

Roc, Aline, Léa Pillette, Jelena Mladenovic, Camille Benaroch, Bernard N'Kaoua, Camille Jeunet, 和 Fabien Lotte。“基于心理任务的脑机接口用户训练方法综述。”《神经工程学杂志》（2020年）。Shah, Rutvik V., Gillian Grennan, Mariam Zafar-Khan, Fahad Alim, Sujit Dey, Dhakshin Ramanathan, 和 Jyoti Mishra。“利用可穿戴设备通过个性化机器学习识别抑郁情绪。”《转化精神病学》11，第 1 期（2021年）：1-18。Shankar, S. Sree, 和 Rahul Rai。“脑机接口头戴设备在三维计算机辅助设计建模中的使用人因研究。”《计算机辅助设计》54（2014年）：51-55。Shneiderman, Ben, Gerhard Fischer, Mary Czerwinski, Mitch Resnick, Brad Myers, Linda Candy, Ernest Edmonds 等。“创造力支持工具：美国国家科学基金会资助研讨会报告。”《国际人机交互杂志》20，第 2 期（2006年）：61-77。Saha, Simanto, 和 Mathias Baumert。“基于脑电图的感觉运动脑机接口中的受试者内和受试者间变异性：综述。”《计算神经科学前沿》13（2020年）：87。Stones, Catherine, 和 Tom Cassidy。“比较新手平面设计师使用数字设计工具与传统设计工具时的综合策略。”Design Studies 28，第 1 期（2007年）：59-72。Sutherland, Ivan E. “Sketchpad：人机图形通信系统。”Simulation 2，第 5 期（1964年）：R-3。Todd, Eric, Jesus G. Cruz-Garza, Austin Moreau, James Templeton, 和 Jose Luis Contreras-Vidal。“自我意识/身体记忆：由实时和存档脑电信号驱动的沉浸式动态艺术装置。”载于《脑艺术》，第 309-323 页。施普林格，Cham，2019年。Ulrike, Gabriel，“Terrain 01”，媒体艺术网，出版机构，1993年，http://www.medienkunstnetz.de/works/terrain/ Wang, Jian-Guo, Hui-Min Shao, Yuan Yao, Jian-Long Liu, 和 Shi-Wei Ma。“用于运动想象识别的个性化特征提取与分类方法。”《移动网络与应用》（2021年）：1-13。Wulff-Abramsson, Andreas, Adam Lopez, 和 Luis Antonio Mercado Cerda。“用脑电波绘画——迈向低脑力负荷的主动式脑机接口绘画原型。”载于《移动脑体成像与艺术、创新与创造力神经科学》，第 183-188 页。施普林格，Cham，2019年。