

【技术哲学】

脑机智能哲学与意识问题

李忠伟

【摘要】脑机智能是通过脑机接口实现的结合生物脑智能和机器智能的智能系统。该系统捕捉人脑的神经活动信号,并由人工智能进行解码,以控制仿生肢体、生成语音或执行其他操作。同时,人工智能根据生物的状态、环境、任务和需求生成对生物身体与大脑的刺激,旨在恢复或增强知觉、行为和情感。然而,当前的脑机智能虽然能够实现一些基本功能,但尚未实现真正可靠的意识体验,也未能帮助主体获得完整的自主感和能动感。在考虑橡胶手错觉、幻肢体验等意识错觉、神经可塑性的科学原理以及延展性的心灵与意识的哲学洞见的基础上,脑机智能能够实现可靠的意识体验和自主感。此外,采用多模态控制信号和反馈,以及利用人工智能进行控制和反馈,能够使脑机智能在功能上更加强大,并且能够提供更真实的意识体验和更强烈的自主感和能动感。

【关键词】脑机智能;身体图示;神经可塑;意识;自主感

【作者简介】李忠伟,浙江大学哲学学院外国哲学研究所研究员。

【原文出处】《社会科学》(沪),2024.2.26~37

【基金项目】本文系科技部科技创新2030—重大项目之“基于脑机融合的人文社科交叉新范式研究”(项目编号:2021ZD0200409)的阶段性成果。

脑机智能(Brain-Machine Intelligence)是通过脑机接口(Brain-Machine Interface)技术融合生物(大脑)智能和机器智能实现的智能。不同类型的神经元在各种活动中会产生不同模式的电信号。人们可以通过侵入式的方法在大脑中植入微电极,或使用非侵入式的脑电帽,采集神经活动电信号,并将其与特定身心状态与活动关联起来。这些关联好的数据可以用于训练神经网络,用训练好的神经网络对新的神经信号进行解码,就可以生成可供电脑控制的仿手执行的指令,或输出语音和词语。早期的脑机接口主要实现的是从人脑到电脑的单向输出。当前的脑机接口则开始探索“脑—机—脑”的闭环信息交换与控制:用人工智能生成特定模式的微弱电流刺激大脑靶区域,可以抑制抑郁,以及产生感觉。

脑机智能技术能从多方面恢复甚至增强人类智能。有实验室和公司试图通过脑机融合实现行为、语言、决策、情绪、感知、记忆等方面智能的恢复与增强。^①脑机智能技术可以解读人脑信号以控制仿生

肢体、输出语言语音、开展联合决策,还有增强人类的感知与记忆的潜力。通过闭环调控,脑机智能可以用于刺激大脑,抑制重度不良情绪。脑机智能甚至有潜力实现新的认知模式,比如大脑之间信息的直接交互。

相比很多颠覆性技术,甚至相比人工智能,脑机智能尤为具有哲学性。这让“脑机智能哲学”有了独立的问题域。哲学的核心主题之一是“认识你自己”,是追问人性本身。技术可以变革人性。但大部分技术是“世界技术”,旨在改变世界。与此对照,脑机智能则是“自我技术”,有直接变革自我的潜力。脑机智能不仅能恢复受损大脑的功能,还能增强和增添智能形式。因此,脑机智能可以激发对相关哲学问题的思考;反之,对相关哲学问题的思考也有望促进脑机智能研究。脑机智能涉及的独特哲学问题可能很多,其中比较一般性的话题有人格同一性、能动性、自主性以及意识问题等;在此基础上,脑机智能也带来特殊的伦理学问题,比如新的安全、隐私问

题,以及脑机融合决策和行动带来的责任归属问题。正是因为脑机智能的独特性,我们可以划定独立的“脑机智能哲学”问题域,将其与人工智能哲学、医学哲学以及神经伦理学等哲学问题域区分开来。

脑机智能哲学涉及方方面面,但本文关注的是脑机接口中的意识问题。当前主流脑机接口研究的重点是功能实现,但还未重点关注意识问题。主流脑机智能的使用者通常缺乏对仿生肢体本身的感觉或意识,也缺乏对仿生肢体所操作的物体的体验。他通常对仿生肢体没有拥有感,更谈不上在仿生肢体中拥有体验。这和我们常人对自己的身体意识非常不同,我们在自己的身体中拥有切身体验:我们的身体不仅是客体,也是主体。当我的左手摸右手时,双手互为被触摸的客观对象,但双手也是进行触摸活动的主体。即使我们不触摸身体,也时刻在体验自己的身体,也即拥有本体感受。我们可以感觉到四肢肌肉的松紧、酸痛、痒等,我们还能体验到手上物体的压力、重力、温度、光滑度等。我们将四肢及其上的感觉或体验归属于自己。我们对身体的意识贯穿在运动中,我们在感觉中运动,在运动中感觉。运动不断带来体验,而体验不断向我们确证自己在运动。简言之,我们通常将身体及其上的体验认定为属于自身的同一性(Identity),我们对身体上的感觉有自我拥有意识(Self-ownership),我们在四肢运动时有自我能动意识(Agency)。

主流的脑机智能在控制仿生义肢以及语言输出等功能上取得了佳绩,但只要脑机智能无法让人在仿生肢体上拥有真实可信的切身体验,人们就会对仿生肢体产生排斥感和陌生感,从而不会真正地将仿生肢体认同为自己的,也难以在仿生肢体中拥有能动意识。不仅如此,机械身体上意识体验的缺失,也有碍于脑机智能高级功能的实现。

脑机智能中人对仿生肢体的本真意识或体验问题,是有效的科学和哲学问题。这之所以是有效的科学问题,是因为根据科学原理与初步实验,人可以在仿生肢体上有意识,不过这种意识在科学和技术上有待改进。而这之所以是有效的哲学问题,是因为脑机智能实现仿生肢体上的意识体验的可能性,可以加深与验证对自我身体以及意识体验关系的理解。

本文将如下展开。首先,我将简要介绍脑机智

能技术的原理与新近进展,然后指出当前主流脑机智能研究在意识问题方面的缺失。其次,我将准备性地阐明意识概念以及相关的身体图示与自我概念。再次,我会讨论一些意识错觉,如橡胶手错觉、幻肢体验,介绍延展意识与认知,以及神经可塑和身体图示概念,为论证通过脑机智能实现意识体验的可能性,以及阐明其哲学后果做理论准备。最后,我将论证基于现有理论和技术,在仿生肢体上实现意识体验不仅可能,而且已经部分实现。文章的结语会回应一些可能的疑虑。

一、脑机接口的新近进展与意识问题

人们最初了解脑机接口,或许是因为马斯克及其治下的Neuralink公司。该公司早期的实验以猴子作为对象,研究者在猴子大脑内植入微电极,以采集信号供芯片处理;接着,训练猴子用手操作控制杆,以移动电脑上的光标;人们采集其手部运动皮层相关的脑电信号,并将脑电信号与光标移动模式对齐,形成数据集;人们用该数据集训练人工智能解码软件;然后断开操作杆与电脑的连接,继续训练猴子;最终,人工智能软件可以实时解码猴子的脑神经活动信息,生成指令,从而控制电脑光标。这样,猴子就能够通过“意念”来玩电子游戏。最近,Neuralink研制的脑机接口微型装置N1获得FDA批准,进入人体临床试验阶段。N1集成了电极、芯片和蓝牙等电子元件,其中被称为“线”的电极组由64组1024根极细的柔性微电极组成,负责从神经元采集信息。神经信号通过电极传递到N1的芯片部分,在经过预处理后,由蓝牙无线传送到计算机用人工智能程序予以解码,生成行动指令。此外,Neuralink还在研制闭环刺激装置,该装置将集成信息的采集和处理系统以及刺激系统。

最近两年,脑机接口控制仿生义肢方面的研究进展迅速。此前脑机接口主要实现的是神经信号控制单只机械臂活动。比如,2020年,浙江大学研究团队实现了通过侵入式脑机接口操作单只仿生手活动。2022年,约翰·霍普金斯大学团队实现了通过脑机接口控制双机械臂协同活动。该团队在瘫痪病人大脑的感觉运动区植入电极,以采集运动相关神经信号并予以解码,然后用解码后的指令与人工智能算法共同控制双机械臂协同进食。^②

脑机智能在语言输出方面的进展也令人瞩目。根据2021年《自然》发表的研究,科学家采集瘫痪病人的手写运动相关神经活动信号,用人工智能将其实时解码,可以实现90个英文字母/分的输出速率。^③而根据2023年《自然》发表的研究,研究者采集因病失语的人的口脸部运动相关的神经元活动信号,对这些信号解码,实现了误差小、速度为62个单词/分的语音输出。^④另据悉,浙江大学有实验室正在研究如何用脑机智能解码手写运动相关神经元信号,实现汉字输出。

脑机智能更为艰难的方向是闭环调控,即从脑到机与从机到脑的双向调控。^⑤闭环的脑机智能目前的实验主要在癫痫病人、重度心理疾病患者身上展开。抑郁发生时,患者的神经活动会有特定模式。通过预测抑郁行将发生时的脑电信号,脑机智能可以在抑郁发生前对特定脑区进行刺激,从而改善患者的情绪。^⑥最近,研究者试图通过机器学习和控制论工具开发数学模型,用以解释情绪症状与大脑活动的对应关系。他们记录癫痫病人的多部位颅内脑电图(iEEG)信号,同时用自我报告问卷量表测量其情绪;然后,构建数学模型,匹配iEEG信号与情绪报告;基于该模型,研究者开发解码器来解读大脑活动对应的情绪变化;最后,他们基于该模型开发控制器,以生成对大脑的电刺激,缓解情绪障碍。^⑦闭环脑机智能可以恢复甚至增强人类感知,如视觉和触觉。有的机构尝试研究“视觉神经假体”,以对视觉皮层进行电刺激,产生视觉经验。更进一步,脑机智能甚至可以产生全新的感知模式。

侵入式脑机智能的关键技术可以分为硬件和软件。硬件主要包括专用芯片、微电极与信息传输电子元件等。在单向脑机接口中,微电极用于采集神经元活动数据,而专用芯片用于接受与处理神经活动数据。在闭环脑机接口中,还需专用芯片生成刺激信号,并用微电极进行刺激。上述硬件固然重要,而人工智能驱动的软件更是关键要素。单向脑机接口的软件主要是人工智能解码程序,而闭环脑机接口还使用人工智能控制对身体与大脑的刺激。那么神经解码器或软件是如何从神经信号识别出字母的呢?首先,人们需要采集神经活动数据,并对数据进行清洗和其他预处理操作。然后,他们会标注与神

经活动模式对应的字词。接下来,他们使用这些数据集来训练神经网络,以便调整神经网络的参数。训练完成后的神经网络可以实时解码神经活动信号。在闭环脑机接口中,控制电刺激的人工智能软件需要根据大脑的实时信号生成调节大脑活动的刺激信号,并根据实时反馈来调整后续的刺激模式。

当前,在单向和闭环脑机智能领域,备受关注的是功能的实现和医疗方面的应用,而并非意识体验问题。然而,人类心灵与意识紧密相关,即便脑机智能可以实现许多功能,如果不能让人重获意识体验,也是有缺憾的。而且让人通过脑机智能拥有对仿生手的体验,对功能的实现也至关重要。如果有人不幸瘫痪或截肢,需要使用脑机智能驱动的仿生肢体,那么他不仅希望能借助脑机智能恢复腿脚与双手的运动与操作功能,而且还会希望在仿生肢体中有本体感觉,能够感觉到物体的温度、光滑度以及物体带来的重力感与压力感,特别是能够感觉到亲人朋友的触摸。总之,他希望自己在仿生肢体中有活生生的、切身的体验,有真实的自主性和能动性,他希望自己的仿生肢体是活的,最好能忘掉他有的只是仿生肢体。

当然,说目前主流脑机接口完全未能实现对仿生肢体的意识体验,未能产生对仿生肢体的拥有感,并在其中拥有能动性,可能是不公平的。患者在使用脑机接口控制手臂运动时,能体验到这是自己意图的实现。此外,根据关于瑞金医院实现的深脑刺激治疗抑郁症的报道,患者能将改善后的情绪当作自己的真实体验。然而,目前主流的脑机智能仍然远远未能全面实现切身的、真实可信的意识体验。

二、意识体验、自我与身体

然而,意识是什么呢?出于不同的理论与实践目的,不同的人使用的意识概念通常不同。科学家和医生所谈论的意识通常与可观察、可测度的生理现象或行为联系在一起。当脑科学家谈论恐惧意识时,他们谈论的可能是生物的规避行为与特定生理表现;当心理学家谈论意识时,他们谈论的可能是工作记忆或对物体的辨识;而当神经外科医生谈论意识时,他们谈论的是与睡眠、麻醉以及植物人状态相对的清醒状态。

然而,上述意识概念还并非哲学家通常采用的意识概念。一些哲学家认为,意识大概就是我們平

时说的“体验”“感觉”或主观经验。^⑧有些哲学家将这种主观体验称为“现象性意识”，认为意识很可能是最为基本的概念，因此无法基于更为基本的概念对其进行分析。不过，有些方法可以让我们理解意识是什么。比如，我们可以通过让每个人内观自己的心灵生活，来向人指示意识是什么。当你感到头痛、头晕，体验到敲击键盘时指尖的感觉，感觉到心情低落或高涨时，你就拥有了意识体验。再比如，我们可以用体验、经验、主观感受等概念来说明意识。这么做并不是定义意识，因为体验、经验这些概念已然包含了意识。不过，这么做仍然有助于理解意识。

但科学家和医生通常说的意识不一定包括哲学家通常所谓的“体验”或“感觉”。对危险的探测和规避有时候发生在意识阈值之下。工作记忆可能是无意识的。盲视患者可以识别物体但却对物体没有体验。处于清醒状态的人对某些认知活动与行动可能是无意识的，而被深度麻醉的人即便对外界没有反应，却也可能体验到其身上发生的一切。尽管主观体验意义上的意识确实很主观，与科学家和医生根据生理活动与行为特征而确定的现象不同，但仍然是实实在在的。

意识体验必然预设主体立场。内格尔在《做一只蝙蝠是怎样的？》的文章中论证说，当蝙蝠有体验时，它就会拥有对自身而言体验起来“何所似”的东西。蝙蝠能体验到靠声呐飞行和探测猎物是怎么样的，这就像我经历头痛时，是我在体验头痛是什么样的。任何意识都必然是对某个主体的意识。然而，对神经机制的客观性的描述，都会离开意识主体的视角，因此不能刻画意识体验。^⑨我们暂且不管为什么从单纯客观视角无法把握体验的主体性方面，重要的是，任何意识都预设意识主体，都有自我性。蝙蝠必然也有主观视角：周围世界的对象给它的体验跟给我们的体验是不同的。

然而，说意识必然预设主体的立场，并不意味着生物在体验时必然体验到是自己在经历体验。将自身的体验归属给自身的能力，要比单纯能够体验的能力更为高级。而完整的人类意识体验有多重维度，如何实现这些维度，是脑机智能面临的重大任务。试述如下：(1)对外部对象的体验：当人通过机器身体感知或操作对象时，应该拥有相应的体验。比

如，当人用假手接触物体表面时，他应该感受到物体的温度、光滑度、物体带来的压力等。这样即使闭上眼睛，他也能通过其他感觉反馈来操作物体。(2)本体体验：即便仿生肢体不接触任何物体，人也要能在仿生肢体中有本体体验，包括仿生肢体中的运动感觉以及重力与温度的感受等。(3)自我拥有意识(Self-Ownership)：自我拥有感指我将自身的行动和体验认同为是自己亲身经历的。仿生肢体的自我拥有感意味着，自我对仿生肢体的行动和其中发生的体验是认同的，没有陌生感和排斥感。(4)自我能动意识(Self-Agency)：我体验到自己是行动的发起者，并能体验到是这些行动给我仿生肢体所发生的体验以及其所处理的物体带来的各种体验。^⑩简言之，我总是体验着“我能”(I can)，体验到自己的行动是反馈性体验的原因。在敲击键盘时，我体验到是自己在敲击键盘，并体验到是我持续的行动带来持续的体验。(5)自主感(Self-Autonomy)：人在自己的经验和运动中，体验到自己是独立自由的，而并非是被外物控制甚至挟持的。脑机智能中的仿生肢体的运动，以及闭环刺激产生的情绪，虽然是计算机硬件以及人工智能程序辅助做出的，但即便如此，也要让人能拥有真实的自主感。在使用脑机智能时，只有仿生肢体中的意识体验满足如上条件，人才能在脑机融合性的身体中拥有真实完整的体验。

意识是具身性的，身体在人类意识体验中扮演重要角色。我们期望人在脑机智能整合进来的仿生肢体中可以拥有真实可信的意识体验。换言之，我们期望仿生肢体不仅是客观性的功能性躯体(Körper, Body)，而且也是活生生的主体性的身体(Leib, lived body)。^⑪躯体是从客观角度理解的物体，尽管该物体可能是功能丰富的工具。然而，我的身躯有双重性：它一方面被我当作躯体，当作被我感知和认识的客观物理世界的一部分；但另一方面，我的身体是主体性的、意识性的、活动性的身体，它感知着世界和作为客体的躯体。

身体作为客体和身体作为主体对应着加拉格尔(Gallagher)所说的“身体形象”(Body Image)与“身体图示”(Body Schema)。根据加拉格尔的区分，“身体形象由与自身身体有关的感知、态度和信念系统组成。与此对照，身体图式是在无意识或无须感知监

控的情况下发挥作用的感知—运动能力系统。身体形象和身体图式在概念上的区别与对某件事情的感知(或信念)和运动能力(或做某件事情的能力)之间的区别有关……身体图式涉及运动能力、技能和习惯,如它们在运动和保持姿势时的作用和影响。当感知的意向对象不是自己的身体时,身体图示仍在继续运作,而且通常运作得最好”。¹²这一区分对脑机智能颇有启示。要想在脑机智能中获得真实可信的切身体验,我们不仅要把仿生肢体纳入自己的“身体形象”,更要将其纳入“身体图示”。前者意味着,使用脑机智能驱动仿生肢体的人,有意识地从认知上相信与接受仿生肢体属于自己的身体形象。而后者则意味着,通过脑机智能,我们经过学习不仅能在其中体验到运动能力、技能的顺畅实现,而且也能在仿生肢体中拥有习惯性的行动方式。可以预见,身体形象与身体图示通常但并不总是完全贴合。虽然有人能将仿生肢体融合进“身体图示”,但他仍然可以在理智上拒斥仿生肢体是自身的一部分;反之亦然。

现在的问题是:人真的能够在仿生肢体中拥有真实可信的切身体验吗?目前脑机智能可以部分地,但还远未能完全实现真实的切身体验。我要阐述一些经验现象与理论概念,以便后续论证,脑机智能原则上能够实现现在仿生肢体中的真实完整的切身体验。

三、意识“错觉”、身体图示与延展意识

下面,我要介绍几个关于身体的意识或体验的“错觉”:橡胶手错觉、幻肢体验与有感觉的假肢。这几种“错觉”有助于理解仿生肢体上的意识体验的可能性。这些现象也充分说明,人的身体图示并非一成不变;而且这些现象也能够基于神经可塑的原则得到解释。身体图示的可变与神经可塑恰好是脑机智能实现真实可信的意识体验的经验基础,而延展心灵和延展意识的原理,是其哲学基础。

(一)有用的意识“错觉”:橡胶手、幻肢与有感觉的假肢

橡胶手错觉由 Botvinick 和 Cohen 在《橡胶手“错觉”到眼睛看到的触摸》首次报告。¹³在实验中,被试在桌前坐定,把双手放在桌子上,在试验期间保持不动。实验人员在被试两手之间靠近左手或右手的位置放一只橡胶手,并在真假手之间放置隔板,以阻挡被试的视觉,让被试只能看到自己的假手,看不到自

己的真手。然后,实验人员同时刺激被试被遮掩的真手和眼前的假手。结果,当被试看到假手被刺激时,感觉假手上有触摸体验。新近研究发现,对橡胶手的拥有感源自前运动皮层特定的神经活动,而这些活动的作用是整合各种类型的感觉信息,比如触觉信息和视觉信息。¹⁴橡胶手错觉有多种扩展或变体,包括在虚拟现实生成的整个身体图像的位置上有感觉。¹⁵诱导身体体验错觉的实验有很重要的条件限制。比如,在橡胶手错觉实验中,被试一定要看到假手被刺激,被试的双手要保持固定。一旦被试闭上眼睛,或者真手在被刺激时同时移动,错觉就会消失。

上述错觉对脑机智能实现意识体验有重要启示。如果人们在橡胶手与虚拟身体上能有体验,能将橡胶手和虚拟身体认定为自身身体,那么脑机智能也能让我们在仿生肢体上拥有体验,并将仿生肢体与其上的体验归属给自己。

幻肢综合征对脑机智能如何实现意识体验也有启示。大部分截肢者都有过幻肢感,即患者感觉到已然不存在的肢体有疼痛或其他感觉。幻肢发生的体验可以是关于幻肢的位置、形状和运动,也可以是关于温度、触觉、压力、振动和瘙痒;¹⁶而幻肢的痛觉则包含灼痛、射痛和刺痛等。触摸患者的截肢处,可以引发已被截掉的肢体的感觉;不过有时触摸截肢患者身体的其他部位,比如脸部或背部,也可以诱导出幻肢上的感觉。

幻肢现象发生的生理机制仍然不完全明确,但人们已找出来几类原因。一种原因是大脑内部的中枢神经的改变或重塑。¹⁷神经可塑指大脑中的神经元结构与功能会因为训练以及身体、环境等因素而发生动态变化。当患者被截肢后,原先对应被截肢体的皮层失去通常的输入,由于失去通常的功用,它会退化,截肢对应的皮层会重新组织。被截肢体对应的脑区的邻近区域会扩展,扩展后的区域的活动会激活以前被截肢体对应的脑区,被截肢体的脑区虽然没有接收到肢体上的刺激信息,但却因邻近脑区的刺激产生了残肢体验。有时刺激截肢处或其他部位时,病人会有幻肢感并在其上拥有体验。另一种原因是外周神经的改变。当外周神经被切断时,受伤的轴突再生,在切断部位形成神经瘤,而残肢神经瘤上杂乱与自发的放电可能会引发幻肢上的疼痛与其他感

觉。^⑧这些解释都依赖神经矩阵表征(neuromatrix)概念,即大脑中自我表征或自我身体图示的概念。自我身体表征有时会在身体残缺时顽固地留存。当个体的肢体被截后,该肢体对应的大脑皮层,以及对肢体的神经表征仍然较为完整。因为缺少源自被截肢体的视觉反馈,肢体残缺与身体表征完整性之间的错位加剧,从而在没有肢体刺激时发生幻肢疼痛。^⑨

幻肢综合征固然有令人困扰的一面,但也可被用来研发有感觉的假肢。有研究者在20世纪90年代开发出肌电控制的电动假肢。假肢的传感器接收电信号并将其传递给控制器,控制器将数据转化为电机运动的指令,最终驱动假肢运动。有趣的是,截肢者可以用幻肢感觉控制假肢装置,并同时缓解幻肢疼痛。^⑩不过,脑机智能驱动假肢的潜力比肌电假肢技术的更大。如果使用脑机接口技术让幻肢图像与假肢重合,那么就可能实现在功能上有效、体验上真实的假肢。我在最后部分会阐述这种前景可能的实现方式。

(二)生物基础:身体图示可变与神经可塑

人的身体图示或对身体的“神经矩阵表征”不一定会因为身体的残缺而全然改变。即使身体图示因为身体残缺而改变,也有办法恢复。脑机智能就提供了恢复原有身体图示的机会。当代重要的脑机接口研究者尼科莱利斯(Nicolelis)认为,人在使用工具时,就能将工具纳入自己的身体图示。他说:“作为工具使用者,人可以将其工具并入大脑产生的身体图示之中。每个人的大脑都会将新使用的工具纳入他们的身体图式中,并实时调整自我感以及相关的感受视野。身体图示的可变性的基础是大脑的可塑性原则。”^⑪实际上,相比通常的工具,脑机智能整合的仿生肢体更容易融入个人身体图示。

如前所述,神经可塑指的是大脑中的神经元结构与功能会因为训练以及身体、环境等因素的变化而发生动态变化,改变自身的结构组织和功能。这属于中枢神经系统的适应能力。正是因为神经可塑,神经系统可以通过学习把原先不属于自身的东西纳入自己的身体图示。神经可塑是脑机接口控制的仿生肢体融入自我图示的神经科学基础。尼科莱利斯说:“脑机接口让被试以新的方式获得关于周围世界的信息,大脑在同化这些信息后产生关于世界

的新模式,包括自我感的新边界或新限制。”^⑫当前,人们还未能在仿生肢体上拥有完整真切意识体验。尽管如此,当人通过脑机智能可以展开行动,并能在行动中体验到自主性和能动性后,通常也会将仿生肢体纳入其自我和身体图示,并将脑机智能实现的行动体验为自己的行动。进一步地,如果脑机智能可以让在融合性的身体上感受到真实可信的体验,那么人们就能在融合性身体中拥有真实可信的自我同一感。

(三)哲学原理:从延展心智到延展意识

传统观点认为,心灵和自我的边界在头颅之内,最多能扩展到身体。然而,克拉克(Andy Clark)和查尔莫斯(David Chalmers)反对这种观点,提出了延展心智理论。他们认为,心灵可以延伸到外部物理与社会环境。具体来说,延展心智理论认为,外部环境的一些物体可以成为认知过程的一部分,参与个体认知,并成为个人认知的构成性部分。克拉克和查尔莫斯论证说:“如果在我们处理某些任务时,世界的一部分在该任务中作为一个过程发挥作用,而这个过程如果是在头脑中完成的,我们会毫不犹豫地承认它是认知过程的一部分,那么世界的这一部分就是……认知过程的一部分。认知过程并非(全部)在脑子里!”^⑬设想一下,奥拓有记忆障碍,他用小本子记下博物馆的地址。如果奥拓能可靠地获取本子上的信息并找到博物馆,那么这个本子就参与了其认知过程,因而可以说是其认知的一部分。毕竟,这个本子及其上的信息,如果是发生在大脑之内的某个区域,我们无疑会将其认定为心灵的一部分。这个本子及其上的信息与大脑中的某个部位及其信息,在心灵中的作用是相同的。类似地,外部设备的计算过程也可以融入我们原有的认知过程,成为我们心智的一部分。^⑭

如果心智能延展,那么意识是否也能够延展呢?我认为答案是肯定的。主要理由是,意识取决于从各方面揭示对象的方式,而脑机智能可以参与关于对象的揭示。饶兰兹(Rowlands)对延展意识的论证有一般性意义。他的论证有三个前提:(1)知觉经验都将必然包含意向性的内容,即对象呈现的方式;(2)意向性的核心就是揭示活动,意向性的揭示活动让对象通过特定呈现方式或体验模式而被体验;

(3)因果性揭示不同于构成性揭示,因果揭示的方式可以包含大脑之外的过程。对意向对象的构成性的揭示指涉的是对象的不同视角的体验方式。饶兰兹将因果揭示与构成性揭示对照起来:“因果揭示可以由意向状态主体大脑中发生的状态和过程构成,但一般而言也不局限于神经状态和过程。因果揭示世界的方式有很多种,即世界可以通过很多载体向主体进行因果揭示,而基于大脑的方式只是其中一种。一般来说,因果揭示的载体并不局限于大脑之内,而是延伸到我们在世界上所进行的活动中,这些活动既是身体活动,也包含了更广泛的环境活动。”^⑤举个例子,盲人借助手杖作为载体/中介来感知事物。当盲人学会熟练使用手杖后,他不会(仅仅)体验到手上的感觉,而是通过手杖直接体验环境及其中的对象。饶兰兹说:“揭示活动部分发生在大脑中,还发生在身体里,也发生在手杖和手杖与世界的互动中。就揭示活动的性质而言,它并没有止步于世界:它通过其物质的实现而发生在世界之内。”^⑥

延展心智与延展意识的可能性对脑机智能与意识问题的启示是:脑机智能原则上能实现脑机融合身体之中的真实可信的意识体验。一旦人们通过脑机智能将仿生肢体纳入身体图示,并能够通过脑机融合性的身体以体验性的方式揭示环境及其中的对象,那么就能够在融合性的身体中实现真实可信的切身体验。这时甚至可以说,意识并非扩展在个人与外部环境之间,因为仿生肢体已经融入个人的身体图示。

四、脑机智能与真实可信的意识体验

总体来说,前文的理论准备对阐明脑机智能与意识问题有深刻启示。第一,幻肢现象说明身体图示与身体的完整性并非严格对应,人对缺失的肢体也可能有所体验并将其归属于自己。关于橡胶手错觉和幻肢体验的生理机制的研究,对开发能让人有真切体验的脑机智能驱动的仿生肢体有重要启示:刺激特定身体部位或大脑部位,可以诱导在仿生肢体上发生体验。第二,身体图示是可变的,其神经科学基础是神经可塑原则。正是因为神经可塑,人可以将脑机智能驱动的仿生肢体纳入身体图示,并在其中实现真切的体验。第三,延展心智理论认定,外部事物能够参与个体心智的认知过程,因而心智能

够延展在自身身体和外界事物之上。如果身体之外的要素能参与揭示世界或对象的活动,那么也就能参与意识体验。既然脑机智能可以让人的心灵扩展在自身与仿生肢体之上,那它也能可信地揭示世界及其中的对象,因而参与意识体验。

可以承认,在目前的技术条件下,脑机智能已经部分实现了在仿生肢体上的意识体验,比如自主感和拥有感。^⑦Alimardani等人描述了脑机接口使用者对仿生手的拥有感“错觉”。当被试发出运动意图,并看到通过脑机智能连接的机器人按照预期的模式活动时,被试就将仿生肢体纳入自己的身体图示,并认为是自己导致仿生肢体活动,因而获得自我能动性。^⑧这种对仿生肢体的拥有感是怎么产生的呢?比如,只要预期的仿生手运动与实际的仿生手运动的误差足够小,且被试有对这个极小误差的反馈,被试就会对仿生手的活动产生拥有感与能动性。研究者把这种诱导出的对仿生肢体的拥有感称为“错觉”。然而,这种错觉也可以说是真实的,因为被试在仿生肢体之中获得了切身的拥有体验。

但是,脑机智能还远未实现真实可信且完整的意识体验。脑机智能在实现真切的能动感、自主感等方面面临几方面的困难。首先,当前脑机智能功能的实现是脆弱的或者无韧性的,这势必影响意识体验;而且,当前已经实现的意识体验是单调的,容易失去的。目前的脑机智能主要依靠视觉反馈来监测仿生肢体如手臂的活动。当人们意图并预期仿生手臂如此活动,并看到它确实如此活动时,人们就会获得对仿生手臂的拥有感。然而,这种体验是单调的。人们仅仅依靠视觉反馈获得对仿生肢体的体验,在仿生肢体中没有丰满的自体感觉及触觉等。由此,人们在仿生肢体中的自主感、能动性也是虚弱的。反馈信息的单薄也会让功能实现变得脆弱。一旦被试闭上眼睛,失去对仿生肢体的视觉反馈,就会难以控制仿生肢体,并失去对仿生肢体的拥有感。当前主流脑机智能的脆弱性还体现在,单纯依靠视觉反馈,很难根据物体的特征,比如蛋糕、葡萄、鸡蛋、水瓶等物体的特征来调整仿生手的操作姿势和力度。这样,人学会用仿生手拿起可乐瓶后,再拿起鸡蛋时,就很容易捏碎鸡蛋。

当然,如果仅仅是为了功能实现的鲁棒性,我们

可以在生物义肢上植入物体识别和特性识别的组件,借助人工智能识别物体类型及其硬度、大小、重量等特征,以实时调整仿生手的姿势、力度等。这样就可以让仿生手在操控各种物体上都游刃有余。采取这种方法能够增强功能,改善体验,因而肯定是脑机智能探索的必然方向。但问题是,这种方案在提升意识体验方面是有限度的,不能让使用者真心地将仿生肢体纳入其身体图示。

根据我的诊断,当前脑机智能难以实现真实可信的意识体验的重要原因是:控制信号和反馈信息的单调性。当前脑机智能依赖单一区域少数神经元信号进行控制;此外,它又过于依赖视觉信息作为反馈。这导致控制变得脆弱,意识体验变得单调匮乏。普通人在身体活动时,整个大脑和身体都有参与。大脑不同区域的神经元参与控制某个肢体;不仅如此,身体的其他部分,包括肌肉、眼睛、周围神经也都以特定的方式影响着肢体的活动。当前脑机接口采用的反馈信息极为匮乏,往往限于单纯的视觉信号。这种匮乏让脑机智能无法实现真切意识体验,以及真切的拥有感、能动感和自主感。相对照地,普通人的活动依靠视觉以及本体感受、触觉、听觉等多模态的感性反馈。这些反馈向人揭示自身和环境及其中对象的状态,最终有助于人顺畅地行动,并拥有丰富的体验。

我认为,采用丰富多元的控制信息和回馈信息,不但可以解决脑机智能系统的脆弱性问题,让人在脑机智能中更好地控制仿生肢体,而且最终能让人在脑机智能系统中实现较为完整且真实可信的切身体验。那么如何实现多元的控制和反馈信息呢?(1)采用多模态控制信息。除了采用多区位的大脑神经信号之外,还应该同时采用肌肉电、神经电以及眼动信号来控制仿生肢体。多模态信息的采集、处理、整合、转换固然是更难的,但会让脑机智能的控制更加精确、高效和坚韧。(2)采集多模态反馈信息。除了使用自然的视觉反馈之外,还应在仿生肢体上配置多种传感器,以采集仿生肢体在静止、运动和做任务时自身的状态信息(包括重力、速度、加速度、姿态、压力等信息),并采集仿生肢体接触到的对象相关的压力、光滑度、温度等信息。(3)反馈信息的转换或替代。将传感器搜集的反馈信息通过感觉替代(sensory

substitution)系统转换为触觉、听觉、温度等针对皮肤和外周神经的各种刺激信息,甚至通过闭环脑机接口转换为对中枢神经的刺激信息。

这里要重点说明的是,最后一个关键步骤受到“感觉替代设备”及其基本原理的启发。感觉替代系统由三部分组成:传感器、转换器和刺激器。传感器采集刺激信息,并将其发送给转换器,转换器解码这些信号并将其发送给刺激器。最早的一种感觉替代方式是“触觉—视觉替代系统”(TVSS),在20世纪60年代由巴赫里塔(Bach-y-Rita)开发出来。该系统由摄像机、信号转换器和刺激器组成。早期的刺激器是点阵式的,每个点位都会发生振动。刺激器被安放在盲人的背部。盲人操控摄像机采集信号,这些信号被转译成刺激器上的振动。当前,刺激器的大小各有不同,也可以被安放在额头上或舌头上。^⑧经过充分训练,盲人可以学会通过点阵的振动来识别与追踪物体,比如追踪桌面上滚动的球,并用手去接住它以免滚落桌面。巴赫里塔的结论性描述特别有启发:盲人通常会报告说:“感觉信息似乎来自摄像机前方,而不是来自背部的振动触动器。因此,在有充分的体验之后,视觉替代系统的使用似乎成了感觉器官的延伸。”^⑨还有,麻风病人失去了手上的触觉,让他戴上装有压力传感器的手套以获得压力信息,然后将这些信息转译为电刺激,并转接到病人前额的皮肤上。在习惯这种装置之后,病人会忽略前额的感觉,直接在手套上体验到对象。

最新的感觉替代系统在传感、解码和刺激等方面都有进展。解码和刺激方面可以融入日益发达的人工智能,而刺激器也可以对神经元予以直接刺激。这些新的发展甚至会促成超级感官的出现。感觉替代系统发展出多种模式,视觉信号可以被转换为触觉、听觉等信息,因而除了有各种类型的“触觉—视觉”替代,还可以有“听觉—视觉”替代。未来,各种传感器的使用会更加多元强大,甚至可以涉及人类感知能力之外的信息。比如,人工视觉是当前的重要研究方向。人工视觉系统由视频采集器、视频处理器和植入体组成。视频采集器获取环境信息并将其传输到视频处理器进行处理。视频处理器生成视网膜电刺激编码,并发送给视网膜上的植入体。植入体芯片解码刺激,并通过植入体电极阵列刺激盲人视

网膜上的残存视神经,从而产生光感。更进一步,摄像机可以采集微观世界、极远处等人类眼睛感知不到的波长,将其转换为人类身体与大脑可以处理和利用的信息。因而,根据感觉替代系统的基本原理,人类不但可以恢复原有的感官能力,甚至可以增强与添加感觉能力,直至实现超级感觉,如超级视力和听觉,并将这些增强与添加的能力纳入身体图示。

感觉替代系统底层的神经科学原理是神经可塑。大脑有能力适应环境和身体的改变,并因而重组其神经连接。在充分训练后,人可以较流畅地解读感觉替代系统提供的信息,形成对摄像机前的空间世界的经验,从而忽略刺激端的感觉,而认为体验来自传感端,比如仿生手的指尖和摄像眼镜。这是大脑神经重组适应的结果。可见,通过感觉替代系统进行感知是一种可以通过训练获得的技能。Hurley和Noë认为,感觉替代能被理解为受控的联觉。联觉是一种感觉导致另外一种感觉的现象,比如,听到一种声音时眼前会出现某种颜色。而联觉的发生当然也可以是神经可塑的结果。他们指出,“触觉—视觉替代系统产生了新的外部模式间映射,即从远端视觉输入源到外周触觉输入,再到躯体感觉大脑皮层。因此,当躯体感觉皮层的性质表达适应后,似乎发生了模式变化,并具有了视觉皮层通常性质表达的视觉特征”。^①简言之,发生在触觉皮层的活动表征了空间中的对象。

脑机智能可以借鉴感觉替代方法,获取关于对象与仿生肢体的反馈信息,并生成刺激,由此产生本体体验和对外物的体验。至少有三种在仿生肢体上获得感觉体验的路径:

(1)“非侵入性体表刺激”路径。比如,被试通过仿生手上的传感器获取对象信息,这些信息被转译为皮肤、额头或舌头等表面的刺激,熟练的使用者会透过皮肤、额头或舌头上的感觉而在仿生手上体验到物体。最近,有研究者研发出灵巧的且有感觉反馈的神经仿生手。仿生手的传感器可以获得残臂肌电信号,人工智能解码这些信号后,可以控制仿生手运动;反过来,仿生手指尖集成了传感器以测量触摸压力,压力信息被转换为对残肢皮肤的刺激,以实现触觉反馈。患者佩戴该神经仿生手后,可以恢复一些触觉,并用以调控进一步的行动。这样就实现了

闭环控制。^②

(2)“侵入性周围神经刺激”路径。仿生手上的传感器所获取的物体信息被转换为对断肢处原本被切断的神经的刺激信息。在2015年的实验中,研究者在义肢上放置传感器,并将刺激信息传导到残肢中的外周神经,以提供感觉反馈。刺激强度与操作物体时仿生手手指用力程度成正比。即便在被蒙上眼睛时,被试也可以根据周围神经的反馈用仿生手做一些灵巧动作。更重要的是,被试可以在仿生手受力的位置上感受到假肢上的感觉。^③被试还可以感知到自己的手在操纵物体,并且“感觉到(我的)手”,“感觉到(我的)妻子触摸我的手”。^④

(3)“侵入性大脑神经刺激”路径。有研究表明,对身体运动皮层内的微刺激(intracortical micro-stimulation, ICM)可以让人产生对本体身体和对象的感觉。^⑤感觉替代系统研究的先驱巴赫里塔看到,人工传感器获取的信息可以被转译为对大脑的直接刺激,由此产生人工感觉。比如,仿生手上传感器的触觉信息可以通过转译器和神经电极,对某些神经元进行直接刺激,实现感觉信息转换。^⑥这种侵入式路径也能让被试产生对仿生手自身和所接触物体的体验,甚至能借此产生视觉体验。《细胞》杂志发表的最新研究表明,在盲人的视觉皮层上植入电极,并对视觉皮层进行电刺激,盲人可以产生光感,获得初级视力,直至产生对形状的视觉感知。^⑦

总之,尽管早期感觉替代系统未能使用人工智能,但人工智能显然应该成为当前的感觉转换系统的强大助力。人工智能可以用于生成控制信号和反馈信号。人工智能对各种信号——脑电、肌电、眼动等信号——进行解码,生成下行的控制信号。同时,人工智能也对仿生肢体上的各种传感器搜集到的信息进行解码,来生成上达到体表、周围神经甚至中枢神经的刺激信号,以让人获得真实可信的体验。

结语

当前脑机智能实现了解码脑电信号驱动仿生手,生成语言、语音等初步功能,并能让人获得基本的意识体验,却远未全面实现真实可信的切身体验和坚实的自主感、能动感。这些在意识体验方面的缺陷又反过来影响功能的实现。橡胶手错觉、幻肢体验以及假肢上的体验等现象实际证明,人可以在

非自我身体之上拥有体验。这些意识错觉的生物基础是身体图示的可变与神经可塑,而其底下的哲学原理,则是心智与意识的可延展性,也即原本并非属于个体的事件或过程,也可参与个体的认知与意识。身体图示的可变、神经可塑以及心智与意识的延展性,这些生物学和哲学原则,可以说明脑机智能原则上能够实现真实可信的意识体验,并实现自主感、能动感和同一感等。通过采取多模态的控制信息和反馈信息,并借助日益强大的人工智能进行控制和反馈,脑机智能不仅有望实现强大的功能,而且能够实现较为真实可信的切身体验。

最后,我还想回应一些疑虑。或许有人会认为,脑机智能实现的体验终究具有异质性,不能融入人类经验。他们会认为,对体表、周围神经和中枢神经的人工刺激是非自然的,和自然生物反馈非常不同,因而会给人完全不同的体验。比如,自然的视觉刺激给人带来的视觉体验与通过感觉替代系统产生的体验非常不同。我的回应有以下几点。首先,脑机智能可以实现一些与自然体验实质趋同的体验。比如,侵入式脑机接口已经可以实现光幻视与人工触觉,这些与自然的视触性质相同,尽管丰富度有差异。其次,脑机智能可以实现与自然体验部分相同的体验。无论是通过自然感官,还是通过脑机智能的人工反馈而体验事物,人们一般会忽略近端的感觉而直接体验意向对象。对象在意识中的揭示与显现是体验的核心构成要素。只要脑机智能能够通过控制和反馈揭示对象,使用者的体验就与自然体验有核心相似之处。必须承认,当前的感觉替代系统促成的人工体验在质量上无法与正常体验相比,而且往往是透过触觉、听觉来体验空间事物,因而“现象感”有所不同。尽管如此,通过对物体采取的行动而变化的信息反馈,感觉替代系统能揭示出空间事物的样貌,并给人以关于空间事物的体验。最后,即使异质又如何?脑机智能有潜力给人以新的感知和体验世界的方式。通过日益发达的传感器,脑机智能可以增强人类现有感官,甚至发展出新的感知方式。

另外,或许有人会担心,脑机融合智能会让人产生对自我身份、自主性等问题的困惑,甚至让使用者产生对自我的疏离感,直到失去真正的自我。有诊断说,这是因为脑机接口介导的动作是绕过周围神

经系统实现的,和其他技术实现的动作感觉起来不同,“由此形成的自我体验和身份感觉也或有不同”。^③对此,我的回应是,只要能够实现真切可信的意识体验,无论这些体验与自然体验是同质的还是异质的,脑机智能对自我同一性和自主性的威胁就可以弱化,或者被转化为普通的身份认同、自我认可的问题,而非脑机智能特有的问题。毕竟,普通人也时常产生自我分裂和身份认同危机。对于普通人和脑机融合之人来说,这种同等只是有一些未来性,但仍然是普通的医学与身心疗愈问题。

此外,有人可能还会担心,人工智能深度介入脑机智能,它生成控制信号与反馈信号,不仅是生物控制自身与环境的中介,而且反过来刺激与塑造生物的大脑与身体,这会深刻影响人格同一性和自主性,最终影响道德责任,脑机智能蕴藏着深刻的道德问题。我自然不否认这点。然而,我认为,人性一直都在流变,道德亦然。人类道德会随着人性的流变而调整,并影响人性。更为重要的现实考量是,当我和一些使用仿生义肢的人交谈,听到他们说新技术如何让他们恢复了身体功能,提升了作为完整的人的自信和自尊,并让他们重新融入社会后,我就更加相信,运用脑机智能恢复甚至增强人类能力,有深刻且积极的道德意义与后果。当前状态下,我认为,这种道德意义压倒了对脑机智能与人格同一性、自主性的关系等问题的哲学考量和现实风险。但辩护这种权衡之后的断语却有待另文讨论。

注释:

①参见吴朝晖:《混合智能:概念、模型及新进展》,《中国计算机学会通讯》2017年第3期。

②David Handelman et al., "Shared Control of Bimanual Robotic Limbs with a Brain-Machine Interface for Self-Feeding", *Frontiers in neurobotics*, Vol.16, 2022.

③Francis Willett et al., "High-Performance Brain-to-text Communication via Handwriting", *Nature*, Vol.593, No.7858, 2021, pp.249-254.

④Francis Willett et al., "A High-Performance Speech Neuroprosthesis", *Nature*, Vol.620, No.1976, 2023, pp.1031-1036.

⑤Yuxiao Yang et al., "Modelling and Prediction of the Dynamic Responses of Large-Scale Brain Networks During Direct Electrical Stimulation", *Nature Biomedical Engineering*, Vol.5, No.4, 2021, pp.324-345.

⑥ Maryam Shanechi, "Brain-machine Interfaces from Motor to Mood", *Nature Neuroscience*, Vol.22, No.10, 2019, pp.1554-1564.

⑦ Yuxiao Yang et al., "A Control-Theoretic System Identification Framework and a Real-Time Closed-Loop Clinical Simulation Testbed for Electrical Brain Stimulation", *Journal of Neural Engineering*, 2018, Vol.15, No.6, p.066007.

⑧ Ned Block, "On a Confusion about the Function of Consciousness", *Behavioral and Brain Sciences*, Vol.18, 1995, pp.227-247.

⑨ Thomas Nagel, "What is It Like to Be a Bat?", *Philosophical Review*, Vol.83, 1974.

⑩ Atsushi Sato, Asako Yasuda, "Illusion of Sense of Self-Agency: Discrepancy Between the Predicted and Actual Sensory Consequences of Actions Modulates the Sense of Self-Agency, but not the Sense of Self-Ownership", *Cognition*, Vol.94, No.3, 2005, pp.241-255.

⑪ 参见 Edmund Husserl, *Ding und Raum*, Den Haag: Martinus Nijhoff, 1973, p.80.

⑫ Shaun Gallagher, *How the Body Shapes the Mind*, New York: Oxford University Press, 2005, p.24.

⑬ M. Botvinick, J. Cohen, "Rubber Hands 'Feel' Touch That Eyes See", *Nature*, Vol.391, No.756, 1998.

⑭ Henrik Ehrsson, et al., "That's My Hand! Activity in Premotor Cortex Reflects Feeling of Ownership of a Limb", *Science*, Vol.305, No.5685, 2004, pp.875-877.

⑮ 被试戴上虚拟现实眼镜, 眼镜中呈现其身后的摄像机呈现的他的背影。这时, 实验者用塑料棒刺激被试背部, 并同时另一根塑料棒移到摄像机下方, 让它看起来在接触被试的“虚幻身体”的背部。结果, 被试在虚拟身体上有了感觉。参见 H. Ehrsson, "The Experimental Induction of Out-of-body Experiences", *Science*, Vol.317, No.1048, 2007; Konstantina et al., "Over My Fake Body: Body Ownership Illusions for Studying the Multisensory Basis of Own-body Perception", *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol.9, 2015.

⑯ Herta Flor, "Phantom-limb Pain: Characteristics, Causes, and Treatment", *The Lancet Neurology*, Vol.1, No.3, 2002, pp.182-189.

⑰ 参见 Kassondra Collins et al., "A Review of current Theories and Treatments for Phantom Limb Pain", *Journal of Clinical Investigation*, Vol.128, 2018, pp.2168-2176.

⑱ 参见 Herta Flor, "Phantom-limb Pain: Characteristics, Causes, and Treatment".

⑲ 参见 Kassondra Collins et al., "A Review of Current Theories and Treatments for Phantom Limb Pain", *Journal of Clinical Investigation*, Vol.128, No.6, 2018, pp.2168-2176.

⑳ Joachim Erlenwein et al., "Clinical Updates on Phantom Limb Pain", *Pain Reports*, Vol.6, No.1, 2021.

㉑ 米格尔·尼科莱利斯:《脑机穿越》, 黄珏莘、郑悠然译,

杭州:浙江人民出版社2015年,第217页。

㉒ 米格尔·尼科莱利斯:《脑机穿越》,第217页。

㉓ Andy Clark, David Chalmers, "The Extended Mind", *Analysis*, Vol.58, No.1, 1998, p.8.

㉔ 关于脑机智能与认知延展性的讨论, 参见叶斌、刘畅:《脑机接口的延展认知解释争议与表征机制》,《自然辩证法通讯》2022年第3期。

㉕ Mark Rowlands, "Consciousness, Broadly Construed", in Richard Menary(ed.), *The Extended Mind*, The MIT Press, 2010, p.285.

㉖ Mark Rowlands, "Consciousness Broadly Construed", p.287.

㉗ 参见肖峰:《脑机接口中的自我认同问题》,《天津社会科学》2022年第3期;另参见 Johannes Kögel et al., "What is It Like to Use a BCI?—Insights from an Interview Study with Brain-computer Interface Users", *BMC Medical Ethics*, Vol.21, 2020.

㉘ Maryam Alimardani et al., "Humanlike Robot Hands Controlled by Brain Activity Arouse Illusion of Ownership in Operators", *Scientific Reports*, Vol.3, 2013, p.2396.

㉙ A. Jeffs, K. Warwick, "Sensory Perception through an Electro-tactile Stimulus Array on the Tongue", 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013, pp.3549-3554.

㉚ Bach-y-Rita et al., "Vision Substitution by Tactile Image Projection", *Nature*, Vol.221, No.5184, 1969, p.964.

㉛ S. Hurley, A. Noë, "Neural Plasticity and Consciousness", *Biology & Philosophy*, Vol.18, 2003, pp.142-143.

㉜ 参见 Gu Guoying et al., "A Soft Neuroprosthetic Hand Providing Simultaneous Myoelectric Control and Tactile Feedback", *Nature Biomedical Engineering*, Vol.7, No.4, 2023, pp.589-598。另据悉, 杭州也有一家脑机接口相关公司 BrainCo, 它正在研发可以给人感觉反馈的仿生手。

㉝ 参见 Matthew Schiefer et al., "Sensory Feedback by Peripheral Nerve Stimulation Improves Task Performance in Individuals with Upper Limb Loss Using A Myoelectric Prosthesis", *Journal of Neural Engineering*, Vol.13, No.1, 2016.

㉞ 参见 Dustin Tyler, "Neural Interfaces for Somatosensory Feedback: Bringing Life to A Prosthesis", *Current Opinion in Neurology*, Vol.28, No.6, 2015, pp.574-581.

㉟ 参见 Sliman Bensmaia et al., "Restoration of Sensory Information Via Bionic Hands", *Nature Biomedical Engineering*, Vol.7, No.4, 2023, pp.443-455.

㊱ 参见 Paul Bach-y-Rita, Kercel Stephen, "Sensory Substitution and the Human-Machine Interface", *Trends in Cognitive Science*, Vol.7, No.12, 2003, pp.541-546.

㊲ 参见 Pieter Roelfsema, "Writing to the Mind's Eye of the Blind", *Cell*, Vol.181, No.4, 2020, pp.758-759.

㊳ 参见 Johannes Kögel et al., "What is It Like to Use a BCI?—Insights from an Interview Study with Brain-Computer Interface Users", *BMC Medical Ethics*, Vol.21, 2020.