

综 述

人类视觉引导动作的行为学和脑成像研究

唐日新¹, 宋爱霞¹, 陈娟^{2,*}¹南京大学社会学院心理学系, 南京 210023; ²华南师范大学心理学院, 心理应用研究中心, 广东省心理健康与认知科学重点实验室, 广州 510631

摘 要: 直立行走和工具使用被认为是人类出现的重要标志。直立行走使人类的双手得以解放, 因此人类可以使用双手去获取食物, 使用工具, 大大提升了人类的生存几率。手部动作的完成不仅需要肌肉、骨骼等末端生物器官的参与, 更需要大脑对环境中的物体的大小、形状等信息进行分析, 选择要完成的动作类型, 并对动作进行提前编码和实时调控。本文将从认知神经科学的角度综述视觉引导的手部动作的研究内容、研究方法、已有理论、存在的争议、一些新的证据以及动作研究在机器人和人工智能领域的应用。

关键词: 视觉; 动作; 抓取; 双通路理论; 腹侧视知觉通路; 背侧动作通路

中图分类号: B842.1

A review on behavior and brain imaging research of human visually-guided action

TANG Ri-Xin¹, SONG Ai-Xia¹, CHEN Juan^{2,*}¹School of Social and Behavioral Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; ²School of Psychology, Center for the Study of Applied Psychology, and Guangdong Key Laboratory of Mental Health and Cognitive Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: Bipedalism (using only two legs for walking) and having the capability to use tools have long been considered characteristic features that differentiate human beings from animals. Being able to walk upright freed up human hands, allowing us to reach, grasp, carry food, make and use tools, which greatly increased the survivability of our ancestors. Hand actions not only involve muscles and joints to execute actions but also require computations in the brain to analyze the visual environment and select the appropriate action, as well as formulate the action before execution and correct it in real-time during execution. Here, we review the behavioral and brain imaging research of human hand actions from a perspective of cognitive neuroscience. The review includes the research contents and methods of visually-guided action, existing theories, current debates, new evidence of existing theories, and the applications of action research in robotics and artificial intelligence.

Key word: vision; action; grasping; two-visual-stream theory; ventral pathway; dorsal pathway

1 前言

我们的大脑每时每刻都在接受视觉、听觉和触觉等信息, 我们因此对外界环境产生知觉。但产生对外界环境的知觉并不是最终目的, 应对周围的环境才是。比如, 看到一个苹果 (图 1A), 我们不只

想看一眼, 我们可能想伸手去拿起这个苹果 (图 1B), 把它放入嘴里, 或者想在吃之前把它清洗干净。如果人无法完成动作, 比如看到食物却无法把它放到嘴里, 看到老虎不会逃跑, 看到台阶不知如何抬腿, 那人对外界环境的知觉又有什么意义呢? 从这

Received 2018-05-16 Accepted 2018-08-06

Research from the corresponding author's laboratory was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31800908).

*Corresponding author. E-mail: juanchen@m.scnu.edu.cn

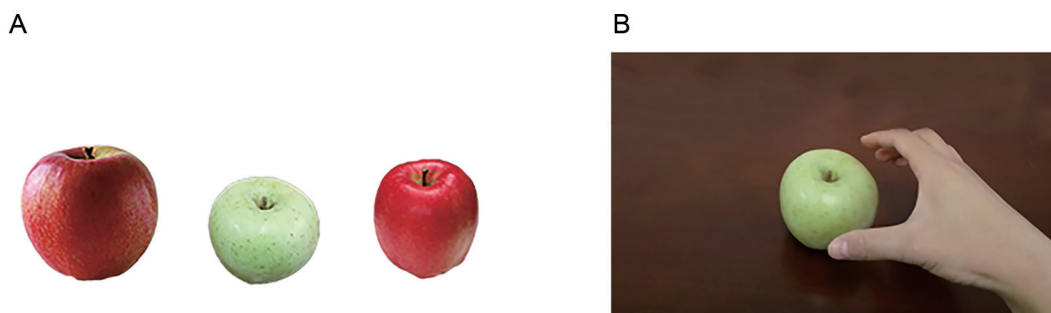


图 1. 物体识别(视知觉)和视觉引导的动作

Fig. 1. Object recognition (visual perception, A) and visually-guided action (B).

个角度讲, 相对于知觉, 动作对我们的生存更加重要。有趣的是, 研究表明即使人类意识不到的视觉信息也可以引导动作, 而且用于引导动作的视觉信息不受某些特定的视错觉影响, 这更加说明了用于引导动作的视觉信息和产生知觉的视觉信息是相对独立的。

日常生活中的动作看似简单自然, 但其实如“伸手拿”、“放入嘴里”、“打开水龙头”、“清洗”、“推门”、“搬东西”和“削苹果”等动作都需要复杂的认知加工。以“拿苹果”为例, 你需要知道苹果离你有多远(距离知觉), 是否够得着(对手臂能够到的空间的预估), 苹果有多大(大小知觉), 手要开多大口才能把它抓起来(抓取的开口预估), 是用两个手指还是整个手掌去抓(动作选择), 苹果有多重(重量预估), 需要使多大力气把它拿起来(力度分析)。再者, 以“走路”为例, 你需要知道路面是否光滑(纹理及材料分析), 是否有障碍物(客体知觉), 如何越过障碍物(动作准备与控制), 台阶有多高(高度知觉), 腿需要抬多高(结果预估)才能顺利走上台阶(运动控制)。所有这些过程都需要视觉、听觉和躯体感觉等感知系统与运动系统的通力协作, 还会受到已有经验知识的调节。

大家对动作的一般印象可能是: 动作需要骨骼、肌肉等的参与, 所涉及的神经系统主要集中在脑干和脊髓, 因此关于动作的研究似乎应该归于医学院的神经科学专业或者体育学院的运动专业。但正如上文所述, 动作, 尤其是手部的精细动作需要多个认知加工脑区的通力协作, 因此也是认知神经科学领域的重要分支。遗憾的是, 目前国内的认知神经科学领域对动作的研究还很少, 国家自然科学基金委员会的基金申请类别里面都没有“动作”这个研究门类。

动作的研究范围可以很广泛, 包括各种动作特

征(动作力度、速度、动作功能等)的神经表征, 发生动作的过程中涉及的视觉(听觉、触觉等)特征分析, 空间表征及多种感知觉特征的融合规律, 以及儿童的动作发展、患者的动作训练等。另外, 动作是区别于有意识报告的另一种“输出”, 本身可以作为一种行为指标用来研究其他认知过程, 如情绪、社会认知、决策等。考虑到篇幅所限, 本文从认知神经科学的角度出发, 简要介绍视觉引导的手部动作的研究内容、研究方法、已有理论、存在的争议、一些新的证据以及动作研究在机器人和人工智能领域的应用, 希望能够起到抛砖引玉的作用, 引起读者对动作研究的兴趣。

2 视觉引导的手部动作

2.1 研究内容

2.1.1 抓取(grasp)、伸手够(reach)、指向(pointing)、工具使用(tool use)等

双手是人类完成动作的主要器官。刚出生的婴儿就会下意识地摸自己的脸, 几个月的婴儿就会有意识地去够东西和抓东西。伸手够和抓取是研究手部动作领域的最重要的两个主题。Jeannerod 作为手部动作研究的前驱者^[1-4], 率先提出伸手抓取物体可以分解为伸手够(手的传送动作)和抓取(手把物体抓住)两个成分。伸手够阶段主要依赖于物体的位置信息(外部信息), 而抓取需要根据物体的大小、形状^[5]、材质^[6]等(内部信息)调整手的大小以及手和物体接触的位置。这种伸手够和抓取两阶段理论也得到生理学上证据的支持, 比如研究发现大脑顶枕皮层(parieto-occipital cortex)负责伸手够^[7, 8], 而前内顶沟(anterior intraparietal sulcus)负责抓取^[9-12]。在皮质顶叶损伤和视觉共济失调患者上的研究也发现了伸手够和抓取的双分离^[13, 14]。

虽然伸手够和指向都涉及物体的位置信息,但是伸手够包含手臂或手的传送,而指向却不一定。人可以伸手够但不指向(如触碰),也可以只指向但不伸手够,比如指向手边的一个物体。Cavina-Pratesi 等^[15]研究了有无传送对动作任务的影响,发现有无传送会引起大脑前上顶叶(anterior superior parietal lobule)的激活差异,而有无指向会引起前上顶枕区(anterior superior parieto-occipital cortex)的激活差异,表明动作的各个成分可能存在单独的表征。

工具使用是一种更复杂的动作。能够开发和使用工具是人类区别于其他动物的标志。为了正确使用工具,我们不仅需要识别工具,还要能理解工具的功能以及准确地操作工具。因此工具使用也被认为是了解大脑复杂功能的最有效的研究主题之一^[16–18]。有研究显示,使用工具时人会觉得工具是上肢的延伸^[19, 20],但是也有研究提示,使用工具来抓取和用手抓取可能有本质的不同^[21]。另外,和观察一般物体不同,观察工具图片乃至真实的工具物体不仅可以激活负责物体识别的外侧枕叶,腹侧枕叶等脑区,还可以自动激活和动作相关的顶叶脑区^[12, 22]。工具的形状是和操作相关的最重要的特征。工具大多数都是狭长的,研究显示这种狭长的特性能够增强负责物体识别的腹侧视觉通路和负责动作的背侧视觉通路之间的双向功能联结^[23]。对该研究结果的一种解释是:狭长的形状使得工具具有了几何主轴,这种主轴增强了工具的可用性,反映在大脑活动上,即增强了大脑腹侧和背侧视觉通路的对话,使得大脑的两个通路成为一个相互协作的整体^[23]。

除了上面介绍的几种动作以外,物体拦截^[24, 25]和障碍回避^[15, 26]也是研究较多的动作。近些年来,对于大脑如何控制执行手部动作的研究数量增长迅速,研究的问题也非常丰富,尤其是对特殊人群比如对帕金森病患者^[27]和自闭症患者^[28, 29]的动作研究等。

2.1.2 影响手部动作的因素

动作不仅受物体本身视觉特征的调节,也会受到视觉反馈,抓取历史,左右手,物体的真实性,以及动作的真实性等外部因素的影响。

一般情况下,我们抓取物体时可以直接看到该物体,因此可以根据手相对于物体的位置,对手的运动轨迹进行实时调整,也就是根据视觉反馈实时控制动作(闭环条件, closed loop)。在动作执行时如果视觉反馈被取消(开环条件, open loop),动作

将会受到何种影响呢?以往研究表明,最大抓握孔径(peak grip aperture, PGA)在开环(动作执行过程中无法看到物体和手)条件下要大于在闭环(动作执行过程中可以看到物体和手)条件^[2]。这可能是因为无视觉反馈时,抓取动作的不确定性增大,所以被试有意增大了手指抓握孔径以保证抓取的有效性。

有趣的是,抓握相同大小的物体时,开环与闭环条件下的 PGA 差值与试次的分布有关。当开环条件和闭环条件分别抓握时(组块设计, blocked),两者 PGA 的差值显著大于开环和闭环条件交替进行时(交替进行, alternating)的差值,也大于开环和闭环随机进行时(随机进行, random)的差值。也就是说在开环和闭环交替或者随机呈现时,当前动作会受到之前开环或者闭环试次的影响。而开环和闭环交替进行与开环和闭环随机进行的 PGA 差值没有显著差异,表明当交替进行时,虽然被试可以预测下一个试次是开环还是闭环,但是被试仍然无法有意识地排除开环和闭环之间的相互影响^[30]。

除了视觉反馈和抓取历史,动作的完成是通过左手、右手还是工具也会对抓握产生影响^[31, 32]。Tang 等研究了左手和右手分别在两种条件下(开闭环单独呈现,开闭环交替)单独抓握和交替抓握,发现左手之前做的动作会影响到随后右手的动作计划,反之亦然。他们还发现之前用拇指和无名指完成的抓握动作,会影响到后面用食指和拇指完成的抓握动作,这表明抓握动作可能存在一个统一表征。而如果之前用工具(比如剪刀形夹子)夹起物体,尽管与手指抓握类似也需要估计物体的大小来张开夹子,但是并未影响到随后的手指抓握动作^[21]。尽管以往众多研究表明工具是手的延伸^[20],当前结果说明两者在动作计划方面还存在差异,因此没有互相影响。

值得一提的是,之前动作对当前动作的无意识影响并不仅仅局限于抓握动作,指向动作也有类似结果。Tang 等^[33]研究了菲茨定律是否也受到动作历史影响。菲茨定律是 Fitts 在 1954 年提出的著名心理学定律^[34],主要内容为 $MT = a + b \times ID$,其中 MT 为运动时间, ID 为任务难度系数,定义为 $\log_2 2A/W$ (A 为目标的距离, W 为目标的宽度), a 和 b 都是常数。该公式表明,当指向更小或者更远的物体时,运动时间更长。Tang 等将大小物体交替呈现让被试点击时,相比于单独点击大的或者小的物体,被试对小物体和大物体的点击动作运动时间

之间的差异变小。

当执行的动作作用于真实物体时,就涉及到功能可供性(affordance)因素。功能可供性是Gibson提出的一个概念,主要指物体可以为个体可能的动作提供机会和线索^[35]。例如一个物体可能适合抓握、按压和投掷等多个动作。功能可供性并不是纯粹的物理属性,而是为个体提供了感受到能执行某种动作的机会,这与个体自身情况也很有关系。例如不同高度的楼梯对腿部长短不同的人来说,攀爬的可供性就不一样,但个体判断为不可爬时的楼梯高度大小与自身腿长成一定比例^[36]。功能可供性存在兼容性效应,例如朝左的物体把手(提供左手抓握的可能性)方向会引起左手动作的反应时减少^[37,38]。

考虑到抓取真实物体需要制作真实物体做实验刺激,为了简便,一些研究选择呈现二维的物体图片,让被试模拟抓取二维图片。已有的行为和脑成像证据都证明,抓取真实物体和抓取二维图片可能有本质的区别。一些在抓取真实物体时表现出来的动作特性在抓取二维物体时并没有观察到^[39-41]。脑成像研究也表明抓取真实物体时,抓取相关的脑区的参与度更高^[10]。

除了被抓取的物体本身的真实性以外,被试有没有真实并及时地抓取也会影响动作完成的效果。模拟的抓取被认为更依赖于被试知觉到的视觉信息^[42-49],而延时抓取更依赖于工作记忆保存的视觉信息^[50-53],二者都受视觉腹侧通路的调节,而真实自然的动作完成受视觉背侧通路的调节。

2.2 研究方法(运动动力学、脑电图、磁共振等)

研究运动自然要用到运动追踪,通过对手指和手腕的运动轨迹的分析来测量动作的各种参数,如手指的开口,运动的速度,加速度等如何受物体本身视觉属性及其他测试条件的影响。虽然脑电图、脑磁图和功能磁共振成像在认知神经科学的其他分支如感知觉、情绪和记忆等的应用已经非常普遍,但是这些技术在动作领域的应用还很不成熟。已有的一些研究为了研究方法的简便,多让被试想象动作或者模拟动作完成,考察大脑的反应。但正如前面所说,物体和动作本身的真实性是影响动作的神经机制的重要因素。在脑电图实验中,被试完成动作时的肢体运动会对脑电信号造成干扰,因此如何去除运动引起的伪迹就变得非常重要。在磁共振实验中为了增加动作的真实度,一些研究者创新性地让被试斜躺在磁共振仪里面^[12](图2),看着眼前的

物体,用手臂完成动作。但是由于动作本身会产生磁场的不均匀性,因此实验设计必须要非常小心,使动作的幅度尽量小,另外还需运用特定的数据分析方法将运动引起的磁场变化带来的影响去除。虽然比较困难,但是考虑到动作研究的重要性,用脑电图和脑成像研究动作已越来越多,一些新的方法和工具包正在迅速产生,相信以上所述的困难会逐步解决。

2.3 视觉的双通路理论

人们一般认为动作是由知觉到的视觉信息引导的。但是在上世纪90年代,研究者发现外侧枕叶(负责物体识别)受损伤的患者,仍能够根据物体的视觉特性调整动作^[54,55]。比如,虽然该患者报告无法区别物体的大小,她却仍然可以根据物体的大小调整抓取物体时手的开口;虽然无法识别物体的朝向,却可以将物体插入朝向不同的槽内;虽然无法识别物体的形状,却可以根据物体的形状调整抓取物体时接触点的位置。这说明即使被试知觉不到物体的某个特性,动作系统也可以使用该视觉特性来调整动作参数。有趣的是,一些顶叶受损的患者可以识别物体的视觉特性,却无法根据这些特性来引导动作^[55]。根据这两类患者的表现,Goodale和Milner提出了视觉的双通路理论^[56-59],即视觉系统包括用于产生知觉(vision for perception)的腹侧系统和用于引导动作(vision for action)的背侧系统(图3)。腹侧通路是指视觉信号从视网膜到外侧膝状体,然后传递到初级视皮层,然后再到外侧或者腹侧枕叶的通路。该通路被认为和物体、面孔以及情景的识别有关。背侧通路是指视觉信号从视网膜

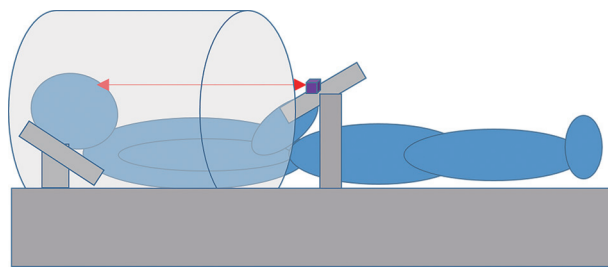


图2. 测量作用于真实物体的真实动作对应的神经机制的脑成像实验装置

Fig. 2. Schematic demonstration of the setup used to study real actions in the MRI scanner. The subjects are positioned with their head tilted in the MRI scanner so that they are enabled to look at the real object in front of them directly and to perform real actions with their arms.

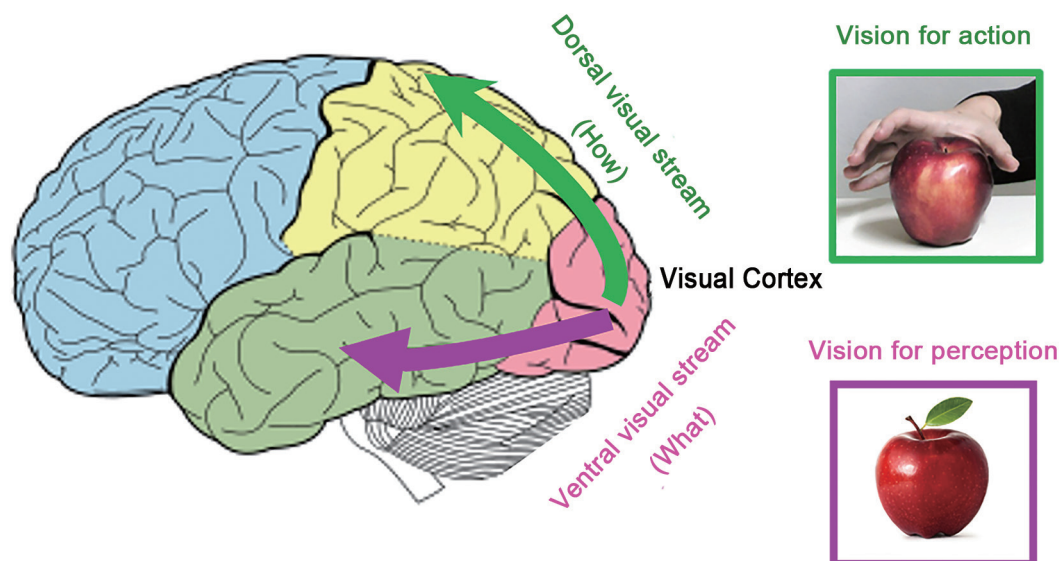


图 3. Goodale和Milner提出的视觉双通路理论

Fig. 3. The two-visual-stream theory proposed by Goodale and Milner^[58]. Vision for perception is mediated by the ventral visual pathway which projects from the primary visual cortex to the occipito-temporal lobe. Vision for action is mediated by the dorsal visual pathway, which projects from the primary visual cortex to the posterior parietal cortex.

到外侧膝状体，再到初级视皮层然后传递到后顶叶的通路。和腹侧通路相比，更多的视觉信号可以从皮下通路直接传递到顶叶的背侧通路。Goodale 和 Milner 著书^[56]详细总结或预测了腹侧和背侧通路对视觉信息加工的不同：腹侧系统对信息的加工比较慢，且容易受周围信息的影响，但是背侧通路对信息的加工必须很快，因为动作的发生是实时的，需要实时反馈，而且动作的发生必须是针对某个物体本身，受周围物体的影响比较小。

值得注意的是，这并不是第一个视觉双通路理论。早在 1969 年，Schneider 就提出了编码物体位置和识别物体发生在视觉系统的不同通路。他把编码位置归功于古老的 retinotectal 通路，而把物体识别归功于比较新的 geniculostriate 通路^[60]。之后的 80 年代初，Mishkin 等在猴子实验的基础上提出视觉皮层有两条通路：一条是从初级视皮层 V1 区投射到颞下皮层的腹侧通路 (ventral stream)，负责物体的识别，或者叫 What 通路；另一条是从初级视皮层投射到顶后皮层的背侧通路 (dorsal stream)，主要负责空间位置和运动的识别，或者叫 Where 通路^[61]。这也是国内一般教科书上提到的双通路理论。但是 Goodale 和 Milner 认为 Mishkin 等的 what 和 where 双通路理论并不能很好地解释从相关疾病患者身上得到的研究结果，比如顶叶损伤的患者不仅

无法指向空间中的某个物体 (即空间任务能力受损)，还无法根据物体的大小调整抓取物体时手的开口。更重要的是，并不是所有的空间认知都是由背侧顶叶负责的，腹侧颞叶受损也可能影响空间认知能力^[62, 63]。这些证据都更加支持 Goodale 和 Milner 提出的视觉的知觉和动作双通路模型，而且越来越多的电生理数据、健康被试的行为数据和脑成像数据都支持该理论。为了和上面提到的 “what” 和 “where” 双通路进行区别，Goodale 和 Milner 的理论也被称为 “what” 和 “how” 双通路。也有研究者结合了两个双通路理论，认为有 what, where 和 how 三个通路。本文的作者并不是研究 where 通路的专家，因此不便对 what 和 where 双通路进行评价。但是在动作研究领域，一种更复杂的提法是背侧通路还可以分为更偏背侧的背侧通路 (dorso-dorsal pathway) 和稍偏腹侧的背侧通路 (ventro-dorsal pathway)^[64, 65]。Dorso-dorsal 通路负责动作的实时控制，而 ventro-dorsal 通路更接近腹侧通路，接受腹侧通路的输入，因此负责动作的组织 (如根据物体大小调节抓取时手的开口)。

2.4 现有争论

除了从相关疾病患者上得来的研究结果外，Goodale 和 Milner 提出的视觉的知觉和动作 (perception and action) 双通路模型得到了越来越多的电

生理数据、健康被试的行为学数据和脑成像数据的支持。比如电生理和脑成像数据都表明在顶叶有负责加工动作的脑区,如负责抓取的脑区和负责伸向的脑区^[12, 66]。在健康被试的行为研究方面,对知觉和动作的双通路理论最重要的支持来自视错觉研究^[67, 68]。根据 Goodale 和 Milner 的理论,动作必须针对物体的物理属性本身,而不一定是知觉到的属性。因此,研究者推断动作应该不受某些视错觉的影响,随后的研究证实了此推断^[67-71],如 Haffenden 等研究视错觉对视觉感知和抓握动作的影响,被试需完成错觉情境下的圆盘的抓握与大小估计任务,结果发现抓握孔径与圆盘物理尺寸密切相关但是不受错觉的影响,而对圆盘的大小估计任务却受到视错觉的影响^[68]。但这些错觉研究的研究方法和结果都受到了质疑^[72-74]。比如有学者认为动作之所以不受错觉影响是因为抓取物体时,手接收了触觉反馈,而完成知觉任务时,被试的手并没有接收到反馈^[73]。在 Goodale 实验室之后的研究中,被试在知觉任务后触摸物体,从而使得被试在两个任务中得到同样的反馈,结果 Goodale 等还是观察到了同样的知觉和动作的双分离现象^[69]。正如 2.1.2 节所提到的,动作受到历史任务、视觉反馈、物体真实性和动作真实性等多方面因素的影响。观察到动作受知觉影响的研究者可能需要思考他们的动作任务是否有知觉成分。比如我们前面提到,模拟抓取和延迟抓取就会受到知觉的影响。另外,Goodale 和 Milner 的理论并不预测所有的错觉任务都不受视错觉影响。如果错觉发生在视觉信号加工的早期,那这种影响就会延续到腹侧和背侧两个通路,因而对两种任务都有影响^[75]。当没有观察到知觉和动作的双分离时,研究者需要仔细分析所使用的测试任务和该任务所涉及到的加工脑区和加工时间进程,而不是武断地下结论说 Goodale 和 Milner 的理论是错误的。对 Goodale 和 Milner 的双通路理论目前遇到的挑战,感兴趣的读者可以查阅 Goodale 实验室最近的综述文章^[76]。

2.5 新证据

如上所述,动作不受错觉影响的研究引起了一些争议。Goodale 实验室最新的两项研究则抛开错觉,从完成感知觉与动作任务时视觉刺激表征的空间分布^[40]和对非视觉信号(本体感觉)的依赖度^[77]两个角度为知觉和动作的双分离提供了新的证据。

在 Chen 等的第一项研究^[40]中,他们测量了刺激的空间分布对大小知觉和抓取开口的影响。他们

将真实物体单独呈现(uncrowded)或者同样的真实物体被包围在其他物体中间(crowded)。中间物体有不同的大小,旁边物体的大小也随机。所有实验刺激都呈现在周边视野,而被试始终盯着正前方的注视点,且始终佩戴眼镜(图 4)。每个试次开始前,眼镜是不透明的,被试需要按下桌面的按钮。实验操作者将物体摆放好后,就会通过按键来打开眼镜。一旦眼镜打开,被试就需要松开桌面的按钮去抓取中间的目标物体。结果显示,即使中间的物体被包围导致被试无法知觉到中间物体的大小时,被试仍然可以根据中间物体的大小来调整抓取物体时手的开口大小。但是该结果只有在抓取的对象是真实物体时才出现,当物体是呈现在显示器上的图片时(图 4 下排),被试的抓取和大小知觉一样受到了周围物体的影响。类似的结果也发生在被试抓取不同形状的物体时,但对右利手的被试,只发生在其用右手而非左手抓的时候^[31]。而且当实验刺激从离中央视野比较近的地方逐步移向更偏周边视野的位置时,被试的知觉表现快速下降,但是他们的抓取表现并没有受到显著影响。这种现象可能是因为腹侧通路对中央视野更敏感,而背侧通路对中央和周边视野同样敏感导致的^[78]。

在 Chen 等的最新研究^[77]中,他们考察视觉深度线索和本体感觉深度线索对大小恒常性的影响(图 5)。结果显示,不仅知觉有大小恒常性,抓取动作也有大小恒常性。抓取的大小恒常性是指只要物体位于手能舒服抓取的合适距离内,无论物体的远近,即无论物体投射在视网膜上的图片的大小,被试都会用同样的手指开口去抓取物体。显然,和知觉的大小恒常性一样,抓取的大小恒常性也需要根据深度线索和视网膜上物体图片的大小来计算物体的真实大小。研究结果显示,知觉的大小恒常性更依赖于视觉深度线索,本体感觉深度线索也有贡献,但是其单独作用不足以引起知觉的大小恒常性。相反,抓取的大小恒常性则既可以完全依赖视觉线索,也可以完全依赖本体感觉深度线索。换句话说,抓取时物体的大小计算可以更加充分有效地利用本体感知深度线索。这也说明知觉任务和动作任务的大小计算存在差异,支持 Goodale 和 Milner 的知觉和动作的双通路理论。

3 应用

如前言所述,动作是人脑的重要功能,是知觉

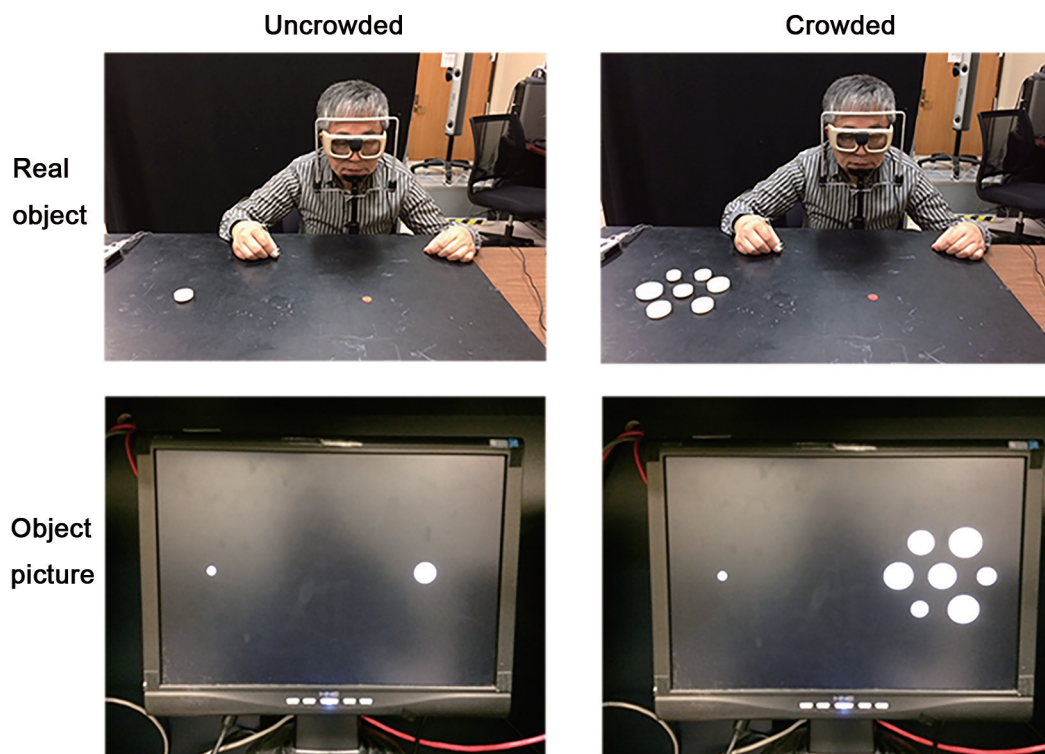


图 4. Chen等^[40]的研究装置

Fig. 4. Experimental conditions and setup of Chen *et al.* ^[40]. Participants were asked to grasp a real object (1st row) or to pretend to grasp the picture of the same object (2nd row) when it was presented in isolation (uncrowded) or surrounded by other objects of different sizes (crowded).

的重要目的。如果人无法完成动作，那人的知觉在很大程度上可能就失去了意义。因此，产生动作意图和根据目标物体的物理参数对动作进行实时控制是大脑的最重要的功能之一。可以预见，如果一个人的大脑能加工感觉信息 (sensory signals) 却不能产生动作意图 (如视觉皮层正常但是动作皮层受损伤的患者)，或者有动作意图却无法根据感知信息灵活地控制肌肉、骨骼完成动作 (截肢的残疾人、动作功能尚未发育完好的幼儿或者动作功能退化的老年人，极端情况如一些仍存有意识的植物人)，那他的生活将是非常困难的。

视觉引导的动作研究涉及大脑利用视觉信息引导动作完成的方方面面，包括大脑如何加工视觉信号，这些视觉信号在哪些皮层通过怎样的计算来引导动作，动作意图如何在大脑中表达，大脑如何根据视觉信号的反馈对动作的执行进行实时控制。这些研究的实用性很强。比如在人工智能技术和机器人技术迅速发展的当前，视觉引导的动作的行为和神经机制的研究可以帮助开发意念控制的机器人来帮助需要帮助的人。如利用计算机视觉技术分析环

境中的视觉信息，并将这些信息反馈给盲人，盲人的大脑对这些信息加工后产生动作意图，做出动作决策，然后利用大脑信号和环境信号的实时交互控制机器手臂，帮助盲人完成视觉引导的动作；利用人工智能技术从植物人的大脑信号中解码出植物人的动作意图，并利用人工智能技术控制机器人，帮植物人完成动作 (即开发意念控制的机器人为植物人再造一个可以控制的机械身体)。类似的技术还可以帮助患者或者儿童和老年人，甚至可以推广到一般正常人的日常生活。在不远的未来，我们可能人手一个“意念”控制的个人服务型机器人，就像现在我们人手一个智能手机一样。到时我们不需要担心物体太重搬不动，不需要担心手里拿着东西腾不出手去开门，这些都可以由个人服务型机器人来帮助完成。目前国际上关于人类脑机接口的研究已经涌现^[79-83]。我国也正在大力支持人工智能和机器人领域的发展，人工智能侧重于计算机技术，机器人侧重于工程，但是制造“意念”控制的机器人离不开对大脑各个脑区的功能和反应机制的研究，离不开对大脑信号的分析，因此当前正是动作

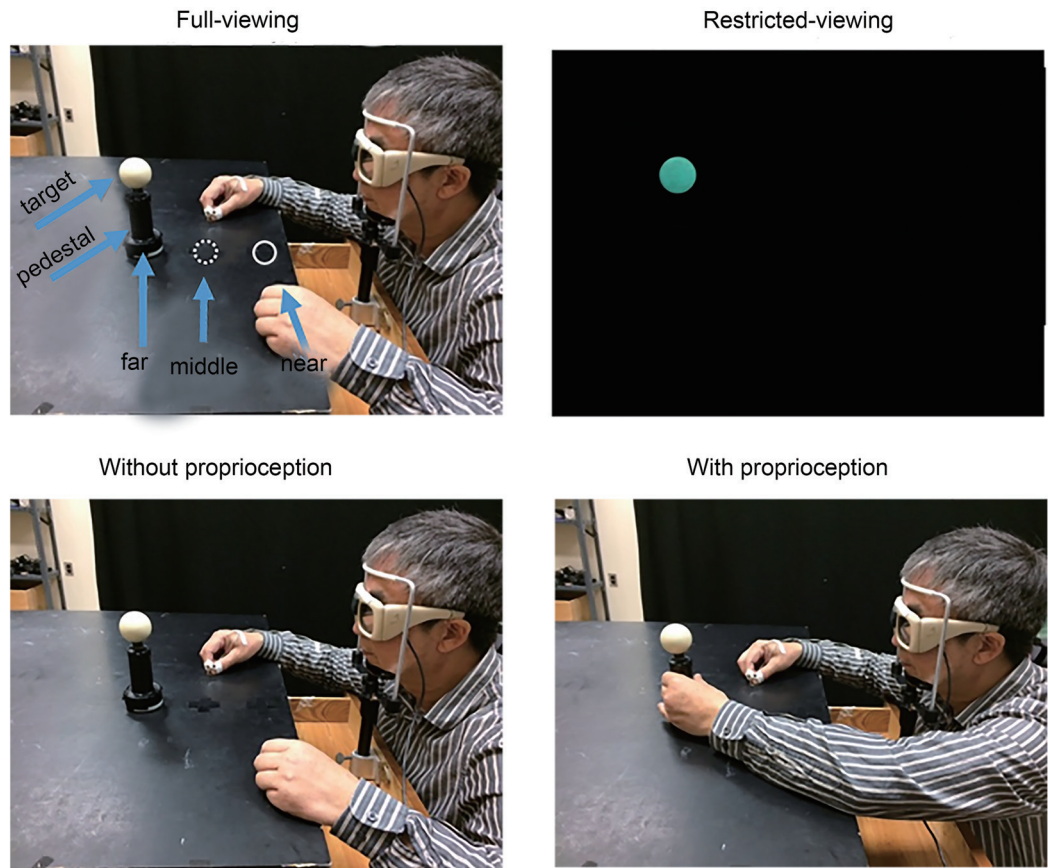


图 5. Chen等^[77]实验中的条件设置

Fig. 5. Experimental conditions and setup of Chen *et al.* ^[77]. Participants were asked to grasp a white sphere in a full-viewing condition (lights on, view binocularly) or a restricted-viewing condition (all lights were off, view monocularly through a 1 mm hole). The white sphere was painted with luminescent paint so that it was visible (although appeared to be slightly green) in the dark. In the “without proprioception” condition, participants’ left hand was placed on the table. In the “with proprioception” condition, participants used their left hand to hold the pedestal under the sphere so that when the sphere and its pedestal were moved to different positions together, the left hand could provide proprioceptive signals to indicate the distance of the target sphere.

研究的大好时机。

除了用于开发意念控制的智能设备外，动作研究在人机交互领域也有重要意义。人在与机器界面交互时通常需要用手或者脚等控制及操作。因此，人的动作和姿势变化等行为指标在工效学领域的研究中非常重要^[84-86]。之前认知方面的研究提供了心理和生理的研究基础，对动作过程的分析则将为可用性评价和人机交互设计提供更加可靠的行为数据支持。

* * *

致谢：本综述受国家自然科学基金项目 (No. 31571131) 资助。

参考文献

1 Jeannerod M. The Cognitive Neuroscience of Action. Black-

well Oxford, 1997.

- 2 Jeannerod M. Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects. In: Long J, Baddeley A (Eds). Attention and Performance IX. Hillsdale: Erlbaum, 1981, 153–168.
- 3 Jeannerod M. The formation of finger grip during prehension. A cortically mediated visuomotor pattern. Behav Brain Res 1986; 19(2): 99–116.
- 4 Jeannerod M. The timing of natural prehension movements. J Mot Behav 1984; 16(3): 235–254.
- 5 Kleinholdermann U, Franz VH, Gegenfurtner KR. Human grasp point selection. J Vis 2013; 13(8). pii: 23. doi: 10.1167/13.8.23.
- 6 Paulun VC, Gegenfurtner KR, Goodale MA, Fleming RW. Effects of material properties and object orientation on precision grip kinematics. Exp Brain Res 2016; 234(8):

- 2253–2265.
- 7 Gallivan JP, McLean A, Culham JC. Neuroimaging reveals enhanced activation in a reach-selective brain area for objects located within participants' typical hand workspaces. *Neuropsychologia* 2011; 49(13): 3710–3721.
- 8 Culham JC, Gallivan J, Cavina-Pratesi C, Quinlan DJ. fMRI investigations of reaching and ego space in human superior parieto-occipital cortex. In: Klatzky RL, Behrmann M, MacWhinney B (Eds). *Embodiment, Ego-space, and Action*. New York: Psychology Press, 247–274.
- 9 Frey SH, Vinton D, Norlund R, Grafton ST. Cortical topography of human anterior intraparietal cortex active during visually guided grasping. *Cogn Brain Res* 2005; 23(2–3): 397–405.
- 10 Freud E, Macdonald SN, Chen J, Quinlan DJ, Goodale MA, Culham JC. Getting a grip on reality: Grasping movements directed to real objects and images rely on dissociable neural representations. *Cortex* 2018; 98: 34–48.
- 11 Monaco S, Sedda A, Cavina-Pratesi C, Culham JC. Neural correlates of object size and object location during grasping actions. *Eur J Neurosci* 2015; 41(4): 454–465.
- 12 Culham JC, Danckert SL, Souza JFXD, Gati JS, Menon RS, Goodale MA. Visually guided grasping produces fMRI activation in dorsal but not ventral stream brain areas. *Exp Brain Res* 2003; 153(2): 180–189.
- 13 Binkofski F, Dohle C, Posse S, Stephan KM, Hefter H, Seitz RJ, Freund HJ. Human anterior intraparietal area subserves prehension: A combined lesion and functional MRI activation study. *Neurology* 1998; 50(5): 1253–1259.
- 14 Cavina-Pratesi C, Ietswaart M, Humphreys GW, Lestou V, Milner AD. Impaired grasping in a patient with optic ataxia: primary visuomotor deficit or secondary consequence of misreaching? *Neuropsychologia* 2010; 48(1): 226–234.
- 15 Cavina-Pratesi C, Connolly JD, Monaco S, Figley TD, Milner AD, Schenk T, Culham JC. Human neuroimaging reveals the subcomponents of grasping, reaching and pointing actions. *Cortex* 2018; 98: 128–148.
- 16 Lewis JW. Cortical networks related to human use of tools. *Neuroscientist* 2006; 12(3): 211–231.
- 17 Baumard J, Osiurak F, Lesourd M, Le Gall D. Tool use disorders after left brain damage. *Front Psychol* 2014; 5: 473.
- 18 Orban GA, Caruana F. The neural basis of human tool use. *Front Psychol* 2014; 5: 310.
- 19 Cardinali L, Frassinetti F, Brozzoli C, Urquizar C, Roy AC, Farnè A. Tool-use induces morphological updating of the body schema. *Curr Biol* 2009; 19(12): R478–R479.
- 20 Umiltà M, Intskirveli I, Grammont F, Rochat M, Caruana F, Jezzini A, Gallese V, Rizzolatti G. When pliers become fingers in the monkey motor system. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2008; 105(6): 2209–2213.
- 21 Tang R, Whitwell RL, Goodale MA. Unusual hand postures but not familiar tools show motor equivalence with precision grasping. *Cognition* 2016; 151: 28–36.
- 22 Macdonald SN, Culham JC. Do human brain areas involved in visuomotor actions show a preference for real tools over visually similar non-tools? *Neuropsychologia* 2015; 77: 35–41.
- 23 Chen J, Snow JC, Culham JC, Goodale MA. What role does “elongation” play in “tool-specific” activation and connectivity in the dorsal and ventral visual streams? *Cereb Cortex* 2018; 28(4): 1117–1131.
- 24 Chang CJ, Jazayeri M. Integration of speed and time for estimating time to contact. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2018; 115(12): E2879–E2887.
- 25 Reid SA, Dessing JC. Spatial biases in motion extrapolation for manual interception. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2018; 44(1): 38–52.
- 26 Striemer CL, Chapman CS, Goodale MA. “Real-time” obstacle avoidance in the absence of primary visual cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2009; 106(37): 15996–16001.
- 27 Parma V, Zanatto D, Straulino E, Scaravilli T, Castiello U. Kinematics of the reach-to-grasp movement in vascular parkinsonism: a comparison with idiopathic Parkinson's disease patients. *Front Neurol* 2014; 5: 75.
- 28 Fabbri-Destro M, Cattaneo L, Boria S, Rizzolatti G. Planning actions in autism. *Exp Brain Res* 2009; 192(3): 521–525.
- 29 Sacrey LA, Germani T, Bryson SE, Zwaigenbaum L. Reaching and grasping in autism spectrum disorder: a review of recent literature. *Front Neurol* 2014; 5: 6.
- 30 Whitwell RL, Lambert LM, Goodale MA. Grasping future events: explicit knowledge of the availability of visual feedback fails to reliably influence prehension. *Exp Brain Res* 2008; 188(4): 603–611.
- 31 Chen J, Jayawardena S, Goodale MA. The effects of shape crowding on grasping. *J Vis* 2015; 15(3): 1–9.
- 32 Tang R, Whitwell RL, Goodale MA. Explicit knowledge about the availability of visual feedback affects grasping with the left but not the right hand. *Exp Brain Res* 2014; 232(1): 293–302.
- 33 Tang R, Shen B, Sang Z, Song A, Goodale MA. Fitts' Law is modulated by movement history. *Psychon Bull Rev* 2018; 25(5): 1833–1839.
- 34 Fitts PM. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp Psychol* 1954; 47(6): 381–391.
- 35 Gibson JJ. The ecological approach to the visual perception of pictures. *Leonardo* 1978; 11(3): 227–235.

- 36 Warren WH Jr. Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1984; 10(5): 683–703.
- 37 Tucker M, Ellis R. On the relations between seen objects and components of potential actions. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1998; 24(3): 830–846.
- 38 Bub DN, Masson ME. Grasping beer mugs: On the dynamics of alignment effects induced by handled objects. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2010; 36(2): 341–358.
- 39 Ozana A, Ganel T. Dissociable effects of irrelevant context on 2D and 3D grasping. *Atten Percept Psychophys* 2018; 80(2): 564–575.
- 40 Chen J, Sperandio I, Goodale MA. Differences in the effects of crowding on size perception and grip scaling in densely cluttered 3-D scenes. *Psychol Sci* 2015; 26(1): 58–69.
- 41 Holmes SA, Heath M. Goal-directed grasping: The dimensional properties of an object influence the nature of the visual information mediating aperture shaping. *Brain Cogn* 2013; 82(1): 18–24.
- 42 Goodale MA, Jakobson LS, Keillor JM. Differences in the visual control of pantomimed and natural grasping movements. *Neuropsychol* 1994; 32(10): 1159–1178.
- 43 Kroliczak G, Cavina-Pratesi C, Goodman DA, Culham JC. What does the brain do when you fake it? An fMRI study of pantomimed and real grasping. *J Neurophysiol* 2007; 97(3): 2410–2422.
- 44 Hermsdörfer J, Terlinden G, Mühlau M, Goldenberg G, Wohlschläger AM. Neural representations of pantomimed and actual tool use: Evidence from an event-related fMRI study. *Neuroimage* 2007; 36: T109–T118.
- 45 Makuuchi M, Someya Y, Ogawa S, Takayama Y. Hand shape selection in pantomimed grasping: interaction between the dorsal and the ventral visual streams and convergence on the ventral premotor area. *Hum Brain Mapp* 2012; 33(8): 1821–1833.
- 46 Westwood DA, Chapman CD, Roy EA. Pantomimed actions may be controlled by the ventral visual stream. *Exp Brain Res* 2000; 130(4): 545–548.
- 47 Jax SA, Rosa-Leyra DL, Buxbaum LJ. Conceptual- and production-related predictors of pantomimed tool use deficits in apraxia. *Neuropsychol* 2014; 62: 194–201.
- 48 Laimgruber K, Goldenberg G, Hermsdorfer J. Manual and hemispheric asymmetries in the execution of actual and pantomimed prehension. *Neuropsychologia* 2005; 43(5): 682–692.
- 49 Fukui T, Inui T. How vision affects kinematic properties of pantomimed prehension movements. *Front Psychol* 2013; 4: 44.
- 50 Cohen NR, Cross ES, Tunik E, Grafton ST, Culham JC. Ventral and dorsal stream contributions to the online control of immediate and delayed grasping: A TMS approach. *Neuropsychologia* 2009; 47(6): 1553–1562.
- 51 Whitwell RL, Striemer CL, Nicolle DA, Goodale MA. Grasping the non-conscious: Preserved grip scaling to unseen objects for immediate but not delayed grasping following a unilateral lesion to primary visual cortex. *Vision Res* 2011; 51(8): 908–924.
- 52 Milner A, Dijkerman H, McIntosh R, Rossetti Y, Pisella L. Delayed reaching and grasping in patients with optic ataxia. *Prog Brain Res* 2003; 142: 225–242.
- 53 Rossit S, Fraser JA, Teasell R, Malhotra PA, Goodale MA. Impaired delayed but preserved immediate grasping in a neglect patient with parieto-occipital lesions. *Neuropsychologia* 2011; 49(9): 2498–2504.
- 54 Goodale MA, Milner AD, Jakobson LS, Carey DP. A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature* 1991; 349(6305): 154–156.
- 55 Goodale MA, Meenan JP, Bühlhoff HH, Nicolle DA, Murphy KJ, Racicot CI. Separate neural pathways for the visual analysis of object shape in perception and prehension. *Curr Biol* 1994; 4(7): 604–610.
- 56 Goodale M, Milner D. *Sight Unseen: An Exploration of Conscious and Unconscious Vision*. Oxford University Press, 2003.
- 57 Milner AD, Goodale MA. *The Visual Brain in Action*. New York: Oxford University Press, 2006.
- 58 Goodale MA, Milner AD. Separate visual pathways for perception and action. *Trends Neurosci* 1992; 15(1): 20–25.
- 59 Goodale MA. Transforming vision into action. *Vision Res* 2011; 51(13): 1567–1587.
- 60 Schneider GE. Two visual systems. *Science* 1969; 163(3870): 895–902.
- 61 Mishkin M, Ungerleider LG, Macko KA. Object vision: Two cortical pathways. *Trends Neurosci* 1983; 6: 414–417.
- 62 Milner B. Visually-guided maze learning in man: Effects of bilateral hippocampal, bilateral frontal, and unilateral cerebral lesions. *Neuropsychologia* 1965; 3(4): 317–338.
- 63 Smith ML, Milner B. Right hippocampal impairment in the recall of spatial location: encoding deficit or rapid forgetting? *Neuropsychologia* 1989; 27(1): 71–81.
- 64 Gallivan JP, Culham JC. Neural coding within human brain areas involved in actions. *Curr Opin Neurobiol* 2015; 33: 141–149.
- 65 Rizzolatti G, Matelli M. Two different streams form the dorsal visual system: anatomy and functions. *Exp Brain Res* 2003; 153(2): 146–157.
- 66 Murata A, Gallese V, Luppino G, Kaseda M, Sakata H. Selectivity for the shape, size, and orientation of objects for

- grasping in neurons of monkey parietal area AIP. *J Neurophysiol* 2000; 83(5): 2580–2601.
- 67 Aglioti S, DeSouza JF, Goodale MA. Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Curr Biol* 1995; 5(6): 679–685.
 - 68 Haffenden AM, Goodale MA. The effect of pictorial illusion on prehension and perception. *J Cogn Neurosci* 1998; 10(1): 122–136.
 - 69 Whitwell RL, Goodale MA, Merritt KE, Enns JT. The Sander parallelogram illusion dissociates action and perception despite control for the litany of past confounds. *Cortex* 2018; 98: 163–176.
 - 70 Marotta JJ, DeSouza JFX, Haffenden AM, Goodale MA. Does a monocularly presented size-contrast illusion influence grip aperture? *Neuropsychologia* 1998; 36(6): 491–497.
 - 71 Ganel T, Tanzer M, Goodale MA. A double dissociation between action and perception in the context of visual illusions: Opposite effects of real and illusory size. *Psychol Sci* 2008; 19(3): 221–225.
 - 72 Franz VH, Fahle M, Bulthoff HH, Gegenfurtner KR. Effects of visual illusions on grasping. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2001; 27(5): 1124–1144.
 - 73 Franz VH, Hesse C, Kollath S. Visual illusions, delayed grasping, and memory: No shift from dorsal to ventral control. *Neuropsychologia* 2009; 47(6): 1518–1531.
 - 74 Kopiske KK, Bruno N, Hesse C, Schenk T, Franz VH. The functional subdivision of the visual brain: Is there a real illusion effect on action? A multi-lab replication study. *Cortex* 2016; 79: 130–152.
 - 75 Milner D, Dyde R. Why do some perceptual illusions affect visually guided action, when others don't? *Trends Cogn Sci* 2003; 7(1): 10–11.
 - 76 Whitwell RL, Milner AD, Goodale MA. The two visual systems hypothesis: New challenges and insights from visual form agnostic patient DF. *Front Neurol* 2014; 5: 255.
 - 77 Chen J, Sperandio I, Goodale MA. Proprioceptive distance cues restore perfect size constancy in grasping, but not perception, when vision is limited. *Curr Biol* 2018; 28: 1–6.
 - 78 Pitzalis S, Galletti C, Huang RS, Patria F, Committeri G, Galati G, Fattori P, Sereno MI. Wide-field retinotopy defines human cortical visual area V6. *J Neurosci* 2006; 26(30): 7962–7973.
 - 79 Ying R, Weisz J, Allen PK. Grasping with your brain: A brain-computer interface for fast grasp selection. In: Bicch A, Burgard W (Eds). *Robotics Research. Springer Proceedings in Advanced Robotics*, vol 2. Springer, Cham, 2017.
 - 80 Chaudhary U, Birbaumer N, Ramosmurguialday A. Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation. *Nat Rev Neurol* 2016; 12(9): 513–525.
 - 81 Muller-Putz GR, Pereira J, Ofner P, Schwarz A, Dias CL, Kobler R, Hehenberger L, Pinegger A, Sburlea AI. Towards non-invasive Brain-Computer Interfaces for hand/arm control in users with spinal cord injury. In: *The 6th International Winter Conference on Brain-Computer Interface*; 2018 Jan 15, 65–68.
 - 82 Johnson NN, Carey J, Edelman B, Doud A, Grande A, Lakshminarayan K, He B. Combined rTMS and virtual reality brain-computer interface training for motor recovery after stroke. *J Neural Eng* 2018; 15(1): 016009.
 - 83 Bandara SV, Arata J, Kiguchi K. A non-invasive BCI approach for predicting motion intention of ADL tasks for an upper-limb wearable robot. *Int J Adv Robot Syst* 2018; doi: 10.1177/1729881418767310.
 - 84 Lin MY, Young JG, Dennerlein JT. Evaluating the effect of four different pointing device designs on upper extremity posture and muscle activity during mousing tasks. *Appl Ergon* 2015; 47: 259–264.
 - 85 Cardoso M, Mckinnon C, Dan V, Johnson MJ, Callaghan JP, Albert WJ. Biomechanical investigation of prolonged driving in an ergonomically designed truck seat prototype. *Ergonomics* 2018; 61(3): 367–380.
 - 86 Lin MY, Catalano P, Dennerlein JT. A psychophysical protocol to develop ergonomic recommendations for sitting and standing workstations. *Hum Factors* 2016; 58(4): 574–585.