

人际协同的多重表征模型——基于认知表征的视角^{*}

宋晓蕾 董梅梅

(陕西师范大学心理学院; 陕西省行为与认知神经科学重点实验室, 西安 710062)

摘要 联合行动是日常生活中非常普遍的一种人际互动形式。成功的联合行动依赖于个体之间有效的协同, 其中共同表征能力是人际协同的基础, 但在联合行动中个体如何表征自我与他人的行为, 目前说法尚未统一。在从认知表征视角对联合行动中人际协同的过程、机制及其理论解释系统梳理和分析的基础上, 提出人际协同的多重表征模型, 即可从空间、具身和社会性表征三个维度理解和解释联合行动中人际协同的内容和过程, 并尝试将其应用于智能人机交互领域人机协同与组队的研究和落地。

关键词 联合行动, 共同表征, 多重表征模型, 人际协同, 人机交互

分类号 B842; B849: C91

1 引言

在日常生活中我们经常需要与他人协同完成联合任务, 如抬沙发、双打比赛等。在这类任务中, 个体需要了解并区分自己与他人的任务角色, 表征彼此的行动, 从而协调自身动作以配合他人更好地完成任务(Curioni et al., 2019)。联合行动(joint action)就是指这种在一定目标的驱动下, 任何两个或以上的个体在空间和时间上协调其动作以给环境带来变化的社会互动形式(Sebanz et al., 2007)。由于任务环境是不断变化的, 个体之间需要经常性地协调以完成任务, 这种人际协同在个体和物种水平上都具有重要意义(Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006)。

联合行动是一种常见的人际协同形式, 成功的联合行动依赖于共同目标驱动下个体的共同表征(co-representation)能力(Astolfi et al., 2020), 以及在此基础上个体对自我和他人行动的监控(monitors)及预测(prediction) (Vesper et al., 2010),

从而确保联合任务顺利完成。共同表征既包括共同表征目标、动作等具体内容(Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006), 也包括共同表征的认知过程(Vesper et al., 2010)。当个体观察他人动作时, 对动作的观察会激活个体已经习得的计划和执行该动作时的表征结构, 此时个体共同表征自我和他人动作内容(Sebanz et al., 2005); 同时, 个体也以功能等同的方式表征自己要执行的动作(Knoblich & Sebanz, 2006; Sebanz et al., 2003), 并且通过实时模拟(simulating)及整合(integrate)自己和他人的行为来表征对方的行为, 此过程即共同表征过程(Astolfi et al., 2020)。众多研究表明, 在个体之间互相协调以完成联合任务时, 参与者会首先表征个人目标、他人目标以及共同的任务目标, 并基于此完成对自己行为的监控和他人行为的预测(Vesper et al., 2010)。早在联合行动开始之前, 个体就计划了如何表征搭档的认知和动作(Kourtis et al., 2013)。大量研究发现并支持在联合行动中操作者的共同表征能力越强, 与他人的联合绩效越好(Beaurenaut et al., 2021; Milward et al., 2014; Sebanz, Knoblich et al., 2006)。可见, 在联合行动中, 表征共同行动者的动作是顺利进行并完成联合任务的基础。因此, 探讨个体在联合行动中如何表征自我和他人动作以提高其表征能力是提高联合任务绩效的关键。

同时, 探究联合行动中的认知表征对于研究

收稿日期: 2022-10-10

^{*} 国家自然科学基金面上项目(32071065); 国家自然科学基金重大项目(T2192931); 载人航天工程航天医学实验领域项目(HYZHXM03001); 中央高校基本科研业务费重点项目(GK202002010)。

通信作者: 宋晓蕾, E-mail: songxiaolei@snnu.edu.cn

智能时代的人机如何协同(human-machine collaboration)和组队(human-machine teaming)也具有重要意义。智能时代的人机关系是一种新的人机组队式的合作关系(许为, 葛列众, 2020)。在人机组队中, 同为认知代理的人类操作员和机器作为队友而合作, 而作为智能体的机器像人类一样具有一定认知、独立执行操作、对不可预测环境的自适应等能力(许为, 葛列众, 2020)。这种新的人机合作关系与人际协同方式类似, 意味着人机组队过程中的高效协同可能也需要人对智能体的表征甚至是智能体对人的表征才得以实现。研究发现, 参与者在与合作度高的智能体合作时共享更多的资源并获得更高的绩效(Li et al., 2020), 这表明人类能够表征机器的行为并据此调整自身之后的表现。此外, 智能体也可借助各种智能交互技术对人类特征和状态进行识别和表征, 整合人类伙伴的可用信息, 并开发高效和自然的人机协同形式(De Vicariis et al., 2022)。弄清楚联合行动中个体如何表征自身和智能体动作, 以及这些表征如何影响其后续的行动(Dolk et al., 2014), 对于提高人机组队绩效和安全、优化人机系统的设计十分重要。因此, 从表征视角探究协同作业系统中人际协同发生及作用的过程, 或可以为建立高效安全的人机交互模式提供新的科学依据。

回顾近 20 年来的联合行动研究, 研究者们考察了联合行动中共同表征能力的影响因素, 探讨了联合行动的认知神经机制并提出联合行动表征的理论解释等。Wenke 等人(2011)用行动者共同表征来解释联合行动的认知机制, 认为个体仅对执行动作的行动者是自己还是他人进行表征, 并不表征个体如何对刺激进行反应。根据以往研究, 关于联合行动中人际协同表征的过程和机制仍模糊不清。因此, 本研究旨在从表征的视角理清联合行动中个体如何与他人协同, 以及阐述人际协同的表征模式对于人机协同和组队的借鉴意义。

2 人际协同表征的过程

2.1 认知机制

以往研究表明共同目标(common goal)是联合行动顺利开展的前提(Wolf et al., 2016)。在执行联合行动时, 人们会表征共同的任务目标, 根据共同目标确定自我目标和他人目标(Vesper et al., 2010), 并在区分自己和他人的部分时形成联

合行动的意图(joint intention) (Knoblich & Sebanz, 2008)。个体基于此意图生成运动共振(motor resonance)和运动模仿(motor simulation), 以表征自我和他人目标(Novembre et al., 2014; Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006), 从而实现共同目标(Knoblich & Sebanz, 2008)。虽然个体使用共同知识(common knowledge)或者通过联合注意(joint attention)替代共同知识来理解他人目标(Carpenter, 2009)。但相比于联合注意仅仅将个体注意力引导到互动伙伴所在位置, 动作观察(action observation)及由此产生的表征更有利于理解他人的行动目标(Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006)。在观察他人动作期间, 观察者动作系统中的相应表征被激活, 这被称为“运动共振”(Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006)。运动模仿指大脑根据执行动作所需的神经资源来表征感知动作的能力, 它可以生成关于我们自己和他人行为的预测(Keller, 2012)。

共同表征是联合行动中人际协同的基础(Astolfi et al., 2020)。在联合行动中, 共同表征过程能够解释人们实际上是如何行动的(Vesper et al., 2010)。如图 1 所示, 在执行联合任务时, 个体首先表征共同的运动目标, 具体可分为表征自我目标与他人目标(Loehr & Vesper, 2016), 接着基于对运动目标的表征预测自己和他人的行为计划(Bolt & Loehr, 2021; Sahaï et al., 2017), 因为两个合作者都必须根据对方的动作计划(并与之协调)在活动中协调自己的动作计划(Astolfi et al., 2020)。之后个体按照确定好的行动计划完成动作执行并预测他人动作执行效果。最后, 为确定行动是否按预期展开, 个体会对动作进行监控和反馈, 以适时调节前面各阶段的执行并最终确保任务目标的实现(Loehr et al., 2013; Vesper et al., 2010)。可见, 包含预测、监控的共同表征过程决定了能否实现共同目标及实现的程度(Sahaï et al., 2017; Vesper et al., 2010), 该过程中个体会形成对目标任务、动作计划和执行等内容的共同表征。如果只有共同目标而没有共同表征过程, 则无法顺利完成联合行动(Bolt & Loehr, 2017; Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006)。即共同目标的实现依赖于个体的共同表征能力。

自上而下对他人行为的预测是联合行动中人际协同的核心(Konvalinka et al., 2014; Pesquita et al., 2018; van der Weiden et al., 2022), 成功的联合行

动取决于基于共同表征能力对他人行为的预测,并据此整合对他人行为预测和自己行为监控的结果(Bolt & Loehr, 2017; Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006)。预测机制由共同表征能力触发(Sebanz & Frith, 2004)。在联合行动中,对自我行为的监控和他人动作的预测是通过观察者动作系统中相应表征被激活实现的,而对自己和他人动作的表征计划是在个体实时预测过程中制定的(Sebanz, Knoblich et al., 2006; Vesper et al., 2013; Wolpert et al., 2003)。

基于此,本文首次在以往研究的基础上从表征视角提出联合行动中人际协同的认知机制(见图1)。

2.2 神经基础

除了探究联合行动中人际协同的表征过程,以往研究也探讨了与表征相关的大脑活动(Bolt & Loehr, 2021),以揭示支持联合行动中人际协同表征的神经机制(Czeszumski et al., 2020)。研究表明低级感知层面的镜像神经元系统(mirror neuron system)(如具身观察和模拟等)和高级认知层面的心理理论网络(Theory of mind network)(对他人行为的预测等)在联合行动中发挥了重要作用(见综述: Cerullo et al., 2021)。在执行联合任务时,镜像神经元系统和心理理论网络能够帮助个体完成表征(Gallese et al., 1996; Wilson & Knoblich, 2005)。

镜像神经元系统与理解他人意图和情绪、观察监控和模仿他人行动相关(刘亚 等, 2011; 叶浩生, 2016; Iacoboni, 2008)。该系统涉及的脑区主要包括顶下小叶(the inferior parietal lobule, IPL)和额下回(the inferior frontal gyrus, IFG),顶下小叶使个体能够通过嵌入模仿(即表征)了解他人的行为和意图,从而促进动作计划的制定,例如在合

作和竞争的人际情境中,个体在双侧顶下小叶均出现了脑间同步和对他人意图的表征(Yang et al., 2021)。额下回与抑制控制相关(Aron et al., 2004),个体在完成目标导向的动作和观察同种运动行为时,额下回会激活(Hamzei et al., 2015),此时个体通过具身模拟(embodied simulation)完成对他人动作的模仿,个体自身动作加工过程中的行为共同表征被激活(Gallese, 2006; Sebanz et al., 2005),这种基于镜像神经元系统脑区激活的共同表征使个体能够制定动作计划并完成动作执行。

作为众多社会认知过程的基础,心理理论指理解他人心理状态/意图的能力(Brunet et al., 2000),即个体观察、解释和预测他人行为的能力(Hopcroft, 2013)。对他人的心理和行为表征离不开对他人心理和行为的理解。因此,心理理论网络在联合行动的表征过程中至关重要。与心理理论相关的脑区之一颞上沟(the superior temporal sulcus, STS)的功能涉及思考和理解他人意图(Behrens et al., 2009)。一项近红外研究表明,由于联合任务需要共同注意和意图理解,个体在右侧后颞上沟的神经激活的脑间同步会增加(Liu et al., 2017)。这表明心理理论参与了个体对运动目标的表征。Liepelt 等人(2015)使用经颅直流刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)技术,发现在听觉联合 Simon 任务中,与心理理论相关的脑区内侧前额叶皮质(the medial prefrontal cortex, MPFC)在控制自生成和他人生成的事件表征方面发挥了关键作用。然而,提高人际协同绩效的神经工效研究才刚刚起步(Barchiesi et al., 2022; Curtin et al., 2019),未来仍有很大的研究空间。

基于以往研究,我们从表征的视角整合了联合行动中人际协同的认知机制,即共同目标是联

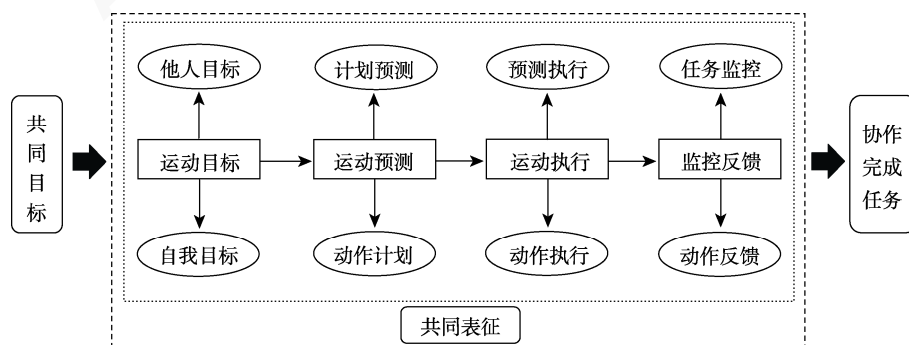


图1 联合行动中人际协同的认知机制

合行动中人际协同开展的前提,共同表征是联合行动中人际协同的基础,对他人行为的预测是联合行动中人际协同的核心。与目标(Hamzei et al., 2015)、共同表征相关(Iacoboni, 2008)的镜像神经元系统和与共同表征、预测相关的心理理论网络是联合行动的重要神经基础(Cerullo et al., 2021; Liepelt et al., 2015)。基于此,本研究论述了镜像神经元系统和心理理论网络在个体表征的过程中如何作用。接下来,本研究希望结合人际协同表征的认知与神经机制研究,深入探究人际协同表征过程背后的原因。

3 人际协同表征的理论解释

以往研究已经尝试从理论层面揭示人际协同表征的内容和过程,其中应用比较广泛的理论包括空间编码理论、共同表征理论和参照编码理论。

3.1 空间编码理论

为了探究个体是否以及如何表征搭档动作并影响自身行为,Sebanz 等人(2003)设计了社会版的 Simon 任务,又称联合 Simon 任务。在该任务中两个个体需要分别对两种刺激中的一种快速而准确地反应。在每个刺激出现时个体首先需判断自己还是对方进行反应。若是判定对方反应,个体需要抑制自己对刺激反应的冲动并监控和预测对方的表现,以确保下一个出现的刺激需要自己反应时能够尽快行动,从而使任务顺利进行。在观察对方反应时个体的镜像神经元会激活,产生与自己对刺激反应时同样的表征(Ford & Aberdein, 2015)。

在该任务中,刺激与反应空间位置一致时相较于二者位置不一致时成绩提高的现象,被称为联合 Simon 效应(joint Simon effect, JSE)或社会 Simon 效应。空间编码理论认为 JSE 在本质上并不是真正的社会效应,而是归因于联合行动/不行动(go/nogo)任务中固有的空间成分,这种空间成分允许参与者在空间上编码他们的反应,从而能够区分与自己和他人生成的动作有关的认知表征,确保适当的任务执行(Baess et al., 2018; Dolk et al., 2011; Hommel et al., 2009)。Dittrich 和同事发现空间反应编码受到反应者和反应键的空间方向的影响,两者都必须与空间刺激维度匹配才能出现 JSE (Dittrich et al., 2013)。也有研究发现在联合随机数生成任务(Joint random number generation

task, JRNG)中,两个参与者共同表征同一个心理数字线,当参与者位于合作者的左侧(相对于右侧)时,他们产生的数字相对较小。这表明参与者用自我中心坐标构建一个共同表征空间,但这种联合空间表征只有在空间参照框架变得突出之后才会构建(Hartmann et al., 2019)。根据空间编码理论的观点,个体首先基于空间维度实现对自我和他人表征的过程。基于自我空间参照框架,个体对空间编码一致的刺激可直接确定是否进行动作执行,而对于空间编码不一致的刺激先进行运动预测,判断自己还是对方应该执行动作,之后如果判定是对方该反应的刺激则通过镜像神经元系统预测对方的计划及执行,如果判定是自己该反应的刺激则纳入动作计划完成动作执行。因此,空间编码影响个体在表征过程中的运动预测和运动执行。

然而,Kiernan 等人(2012)使用双选择联合 Simon 任务发现个体表征模式不符合空间编码理论,相反,动作共同表征理论可以解释 JSE。Sellaro 等人(2015)也提出参与者对空间的编码并不能引起 JSE,而是不同的行为事件特征导致 JSE,但前提是这些特征要突出到足以提供行为者动作的参照编码。

3.2 共同表征理论

该理论认为,在联合任务中个体不仅表征自己的动作,也以一种功能类似的方式表征他人的动作,并将他人的动作整合进自己的认知系统(Sebanz et al., 2003)。共同表征理论又可细分为动作、任务和行动者共同表征理论三种(徐胜,宋晓蕾,2016)。Kiernan 等人(2012)通过消除由任务目标和反应之间的空间重叠引起的混淆,让参与者完成了双选择任务和联合 Simon 任务,要求参与者集中精力在与他们反应相反的空间中产生反应。结果在双选择任务和联合任务中存在负相容性效应。这些发现支持动作共同表征是 JSE 的基础机制,并表明一组类似的机制会导致选择和联合任务的相容性效应(Kiernan et al., 2012)。类似地,在联合数字大小判断任务中,两个参与者会从自我和同伴的视角表征与自己任务相关的刺激,当自己和同伴视角看到的数字不同(6, 9)时,比两人视角数字相同(5, 8)时反应更慢。即使同伴与自己的任务不同时,也会产生类似的共同表征模式(Surtees et al., 2016)。在联合数字奇偶判断任务中,

两个参与者分别对阿拉伯数字 2~9 的奇偶性中的一种做出反应。此时个体通过具身的镜像神经网络建构了心理数字线同时表征自己和他人的行为,因此左侧被试对小数字反应更快,右侧被试对大数字反应更快,这被称为空间-数字反应编码联合效应(Spatial-Numerical Association of Response Codes effect),即 SNARC 效应(Atmaca et al., 2008)。

根据共同表征理论,人际协同的表征过程涉及表征共同目标、运动预测和运动执行。例如,在音乐转移学习范式中,钢琴初学者首先要学会在与他人伴奏的联合动作环境中演奏简单的旋律,从而产生二重唱。然后参与者需要单独完成旋律(个人动作目标)或再次完成二重唱(共同目标)。结果发现参与者在个人目标条件下比在共同目标条件下犯了更多的错误。这证明了人们与他人一起学习一个新动作时形成对共同目标的表征,且参与者能够同时预测他人行为,并在计划和执行联合行动时纳入了对他人行为的预测(Loehr & Vesper, 2016)。

然而,共同表征理论对表征过程的解释性仅限于共同表征是一个自动的、特定的社会互动过程;该理论无法解释为何非社会事件能够产生类似 JSE 的效应(Sellaro et al., 2015)。此外,特定联合动作表现与基于位置的社会返回抑制而非运动共同表征相关(Atkinson et al., 2014)。当参与者们面对面交替执行相同动作时,个体对出现在同伴先前反应位置的目标的反应速度较慢,此时运动效果受到视觉刺激位置和任务的知觉需求的调节(Atkinson et al., 2014)。这表明共同表征理论更多考虑到联合行动的社会性一面,而忽略了空间及知觉层面的表征编码。因此,根据共同表征理论,仍然缺乏对联合行动表征过程的准确理解,进而无法系统阐释联合行动的真正原因。

3.3 参照编码理论

参照编码理论将联合行动中的表征内容从单个空间维度扩展到多个可感知维度(颜色、情绪、个人特征等),该理论认为操作者会感知其它联合或非联合的事件,并以一种类似编码自身动作的方式来表征他人的动作(Sellaro et al., 2015; Dolk et al., 2014)。在联合任务中,即使让两个操作者各自执行任务中的一部分而不要求他们合作,个体也会表征他人目标,监控他人任务、预测他人要执行的动作,从而制定自己的动作执行计划

(Astolfi et al., 2020; Bolt & Loehr, 2021),即他人动作及其它显著性客体或事件的存在也会引起刺激与反应特征的空间重叠,从而影响参与者自身的反应编码(宋晓蕾等, 2017)。与参照编码理论的核心观点一致,宋晓蕾和贾筱倩等人(2020)发现不论情绪效价的高低,高唤醒度刺激都是提高个体联合任务中共同表征能力的关键。在联合 Flanker 任务中也发现即使刺激(字母、颜色)和反应之间的联系是任意的,与协同者任务相关的刺激也会激活个体行为的表征,影响个体对他人的预测和错误监控。当感知到协同者面对的刺激与反应不一致时,个体的绩效会降低(Atmaca et al., 2011)。

然而,引用参照编码理论需要基于以下假设:引用反应编码对于区分替代动作事件是必需的,并且有突出特征的事件可以提供反应的引用编码(Sellaro et al., 2015)。因此,参照编码理论仅能解释联合任务中存在显著特征事件的情况下个体是如何表征的,但又忽略了空间物理、自我与他人的区分及社会性因素本身在表征编码中的作用。

3.4 小结

综上所述,三个理论都尝试解释人际协同中个体是如何表征的,但对于表征为何发生的解释不同。空间编码理论从空间维度来解释表征过程,共同表征理论从社会性维度来解释表征的过程,参照编码理论从多个感知维度(颜色、情绪、个人特征等)解释表征的过程,但认为仅是个体感知到的某个维度的知觉显著特征影响了表征的产生。同时三个理论对人际协同表征的解释都具有局限性。如空间编码理论不能解释具身特征或社会因素对人际协同表征的影响;共同表征理论不能解释空间因素如何作用于该表征过程;而参照编码理论虽然尝试从多个维度来解释个体的表征过程,但只有在某个感知维度的知觉特征显著的情况下可以阐释个体之间的协同现象。特别是上述理论多对联合行动中衡量个体共同表征能力大小的联合 Simon 效应产生的原因进行一些理论解释,对于人际协同其他任务中的表征过程和机制探究较少。

此外,上述理论均没有系统考虑实际的联合行动或协同系统中空间、具身以及社会因素协同对表征能力和任务绩效的影响。为了更好地解决联合行动中人际协同的机理以及情境因素(物理、人际、社会)对协同绩效的影响,以进一步服务于

智能人机交互(intelligent human-computer interaction)中人-智能体的协同与组队等问题,我们尝试提出人际协同的多重表征模型以系统化解决上述理论的局限和不足。

4 人际协同的多重表征模型

在梳理以往人际协同表征的相关理论解释和影响因素实证研究的基础上,本研究提出人际协同的多重表征模型(见图2),该模型的基本观点是联合行动中的操作者表征可以从空间、具身和社会性表征三个维度加以解释。在联合行动中,个体表征自己和他人的动作,并在表征过程中实现对自我动作的监控和他人动作的预测(Knoblich & Sebanz, 2008; Vesper et al., 2010),以确保联合任务的完成(Iani et al., 2011)。在表征他人动作时,个体通过模仿实现对他人即将执行动作的动向的预测,即空间预测(Sebanz & Knoblich, 2009),此时个体基于空间一致性编码自动激活行为倾向(宋晓蕾, 2015),因此空间预测能力与空间一致性效应密切相关。而动作模仿依赖于动作观察,会激活镜像神经元系统(具身模拟)中与动作执行相同的表征(叶浩生, 2016; Gallese, 2006)。同时个体以编码自身动作类似的方式表征他人的动作(Sinigaglia & Butterfill, 2020),并将他人动作整合进自己的认知系统(Dolk et al., 2014; Sebanz et al., 2003),借助心理理论网络理解他人行为及背后的意图(叶浩生, 2016; Brunet et al., 2000)。由于个体对他人的行动表征是基于与他人互动的可能性做出的反应,因此这种表征在本质上可能是社会性的(Keller et al., 2014)。

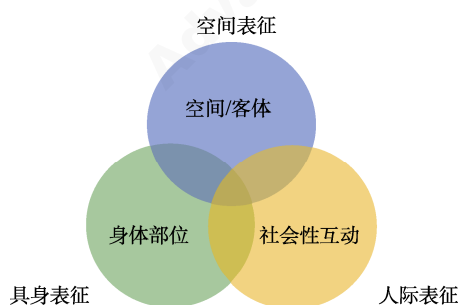


图2 人际协同的多重表征模型

结合前文提到的认知机制,在人际协同过程中,个体首先从空间维度对运动目标(包括自我与

他人目标)进行表征;然后基于空间和具身维度对运动计划(包括对他人的具身观察以及模拟和预测自我与他人计划)进行表征;接着个体基于空间表征完成自己的动作执行,并通过具身和社会性表征完成对他人的动作观察并预测他人动作执行结果。最后,具身表征能帮助个体整合自我与他人行为,促进任务监控和动作反馈。下文将依次介绍联合行动中空间、具身和社会性三个维度如何影响个体的表征过程。

4.1 空间表征

空间表征的研究主要探索空间维度的编码对人际协同的影响(Sun & Thomas, 2013),如空间相容性效应(Spatial Compatibility Effect, SCE)的作用。SCE指当反应侧与空间刺激特征相容(在同侧)时,操作者的反应比其不相容(不在同侧)时更快、更准确的现象。联合任务中的空间位置编码会引起基于客体的SCE(宋晓蕾, 2015; 宋晓蕾, 王丹等, 2020; Hartmann et al., 2019),不论是否要求操作者将旁边他人的动作/任务纳入到自己的动作计划当中,刺激位置与反应位置在同侧比在对侧时被试反应更快(宋晓蕾等, 2017)。这表明个体将他人的动作整合进自己的认知系统(Dolk et al., 2014; Sebanz et al., 2003)。

空间信息是人际协同中的重要影响因素,根据心理理论,在空间交互任务中个体会判断他人进行动作时的目标意图,从他人空间视角表征刺激位置(肖承丽等, 2019)。在表征过程中个体会对他人的行动趋势进行空间预测,从空间维度表征他人目标、预测他人运动计划和运动执行(即计划预测和预测执行)(Sebanz & Knoblich, 2009),以确定自己的动作计划和执行。研究发现,让参与者在进行空间相容任务的练习之后再执行联合Simon任务,JSE会减弱(Ferraro et al., 2011);而让参与者先进行空间不相容任务的练习后再进行联合任务,JSE则会消失;但是如果让参与者在练习和之后的阶段交换身体位置,JSE又会出现(宋晓蕾等, 2018)。产生这种现象的原因可能是空间相容练习使个体的空间预测能力增强,更好地在空间上编码反应,从而能够区分自己和他人生成的动作有关的认知表征,以实现联合任务目标(Dolk et al., 2011; Hommel et al., 2009)。综上,空间因素影响联合任务中个体间的协同能力,特别是操作者的空间物理环境、空间物理位置及反应位置对

操作者协作绩效影响较大(Dittrich et al., 2013)。

4.2 具身表征

具身(Embodied)是指身体通过感觉和运动体验(感觉运动系统)来影响认知(叶浩生, 2014)。具身表征的研究聚焦于个体具身特征对其人际协同的影响。联合行动的神经基础研究首先为人际协同的具身表征性质提供了神经科学的证据。镜像神经元系统是具身认知的神经系统(Iacoboni, 2008)。在共同运动目标的驱动下,个体通过动作观察实现动作模仿,并激活与动作执行相同的表征(Gallese, 2006),此时个体与镜像神经元系统相关的脑区被激活(Gallese et al., 1996; Wilson & Knoblich, 2005)。具身表征为表征过程的运动目标(自我和他人目标)、计划预测(观察动作)和动作执行的实现提供了保障。实证研究也表明,个体的身体姿势和身体状态作用于其在联合行动中的共同表征能力(Gonzalez et al., 2011)。在联合 Simon 任务中将个体双手缚于身前/身后来改变其反应手的状态后,个体的动作模拟受限抑制了表征,因而不会产生基于共同表征的观察学习(宋晓蕾等, 2018)。情绪对认知加工的影响也表现出具身特征(刘亚等, 2011),低效价高唤醒度的情绪能增加个体在联合任务的共同表征能力(宋晓蕾, 贾筱倩等, 2020)。

联合 Simon 效应的产生也与具身的感觉通道有关。联合任务中个体会在视觉上把附近他人的手纳入自己的身体图式中,产生共享的身体表征,此时对他人手部空间位置的刺激识别变快(Sun & Thomas, 2013)。但以触觉方式呈现刺激时,参与者之间的共同表征能力较弱(Pérusseau-Lambert et al., 2019),这表明在触觉上个体对他人的认知表征并没有达到完全自动化的程度。这种效应弱化的现象也可能源于参与者之间缺乏共同的感觉空间。上述研究支持了具身认知的观点:认知加工与感觉-运动系统之间存在契合关系(叶浩生, 2014)。

4.3 社会性表征

参与者所处社会环境中的各种因素以独特的方式改变人们的认知表征能力和联合绩效(Meagher & Marsh, 2014)。首先,参与者对他人的表征取决于操作者对同伴意图和行为的感知(Ruys & Aarts, 2010; Surtees et al., 2016)。良好的同伴关系能促进表征过程, Iani 等人(2011)发现不

论是与内群体还是外群体成员联合行动,均出现 JSE,但参与者只有感知到积极而非消极的同伴依赖关系才会表征同伴行为。此外,同伴角色(Grynszpan et al., 2019; Roberts et al., 2021)、同伴性别(van der Weiden et al., 2016)、同伴行为的可预测性(Bolt & Loehr, 2017)、同伴熟悉度(Iani et al., 2019)等也影响联合行动中的共同表征能力(Baess & Prinz, 2015; Sebanz et al., 2005)。这些研究均表明个体对他人的表征能力建立在感知同伴甚至良性同伴关系的基础之上。

其次,人际因素也作用于自我-他人表征能力(Quintard et al., 2020)。相较国际合作情境,人际竞争情境抑制了 4~5 岁幼儿联合行动的表征能力(宋晓蕾等, 2017),这是因为 4~5 岁的幼儿不仅能够表征自己的任务,而且可以表征任务伙伴的意图、目标或行动的各个方面(林琳琳等, 2021; Milward et al., 2014)。此外,搭档间的人际距离越近,自我对他人信息表征的替代性体验就越强(杨帅等, 2014)。如与朋友联合行动时, Simon 效应可通过同伴在场时的认知视角和不在场时的幻想倾向来预测(Ford & Aberdein, 2015)。与之对应的人际协调水平越高,操作者对他人的共同表征能力越强,联合绩效越好(Ciardo & Wykowska, 2018; Michael et al., 2016)。此外,其他社会性因素如语言文化环境也影响操作者的表征能力。多元语言文化会促进个体情境下的认知转换和表征功能,降低社会情境下的对应功能(郭人豪等, 2020)。

4.4 人际协同多重表征的证据

上文分别阐述了空间、具身和社会性表征三个维度在联合行动中人际协同的表征过程中的重要性。实际上,这三个维度是同级且交互重叠的关系。首先,从个体内部来说,具身维度表征(对他人动作的具身模拟)促进了个体对空间维度(空间位置、物理环境等)信息的表征;其次,从个体之间来说,具身维度表征(对他人动作的观察)有助于个体对社会性维度(社会因素以及对他人行为预测等)的信息加以表征;最后,在人际协同的表征过程中个体内部的空间表征也与个体之间社会性表征相互产生影响。一方面,空间维度表征要考虑社会性维度表征的影响;另一方面,空间维度信息的明确性又影响社会性维度的表征效果。

就个体内部而言,个体在空间交互任务中使用具身模拟的方式建立空间参考框架来表征空间

信息(肖承丽 等, 2019; 肖承丽 等, 2021)。例如, 在完成双人锯蜡块的任务后再让个体对屏幕呈现的刺激进行反应时, 个体通过镜像神经网络在视觉上把附近他人(朋友)的手纳入自己的身体图式中以实现目标, 此时参与者能更快地表征朋友手部附近的目标以制定运动计划并完成动作执行, 这表明共享的身体表征在将注意力(任务监控)偏向他人手附近的空间方面起着重要作用(Sun & Thomas, 2013)。

从个体之间来看, 具身表征(对他人动作的观察)和社会性表征交互作用于人际协同过程。基于镜像神经系统的具身表征能够联合心理理论网络帮助个体理解和预测他人的动作和目标, 促进任务监控和动作反馈。在联合 SNARC 任务中, 个体基于具身认知视角将数字符号转换为心理数字线, 并将自己动作与观察到的同伴动作纳入统一的认知系统, 以此来共同表征自己的动作执行和他人动作的预测执行, 因此更易将左(右)边数字表征为小(大) (Atmaca et al., 2008)。

此外, 个体内部的空间表征和个体之间社会性因素在人际协同的表征过程中相互作用。在联合 Simon 任务、联合 Flanker 任务、联合 SNARC 任务中, 共同完成任务的协同者处于一种人际互动状态, 个体对任务的空间信息表征受到同伴的影响(Atmaca et al., 2008; Atmaca et al., 2011; Ruys & Aarts, 2010)。一方面, 从空间维度表征刺激时, 会受到社会性维度的自我和他人区分能力的影响, 个体基于心理理论的神经网络分别从社会性维度的自我和他人视角建构刺激的空间表征(肖承丽 等, 2019)。即个体在表征共同的运动目标时会分别表征自我和他人目标。例如, 个体在表征自己的手部空间和接近他人手部的空间刺激时加工方式不同(Sun & Thomas, 2013)。合作情境下的 JSE 大于竞争情境下的 JSE, 合作情境下的共同表征能力更好(Yang et al., 2021), 这进一步表明不同社会情境下个体的空间表征编码存在差别。另一方面, 空间维度信息的明确性又影响社会性维度的表征。当同伴坐在操作者的手部周围空间之外时, 个体不会表征同伴的动作(Sun & Thomas, 2013), 这可能是因为空间信息的有限性使得个体此时无法预测他人动作计划和动作执行并获得动作反馈, 此时心理理论网络未激活, 无法建构他人视角的表征。

综上所述, 具身的视角采择同时包含空间和社会线索, 具身表征能够促进个体对社会性他人(人而非物体)视角的空间信息的获取(肖承丽 等, 2021)。因此, 空间、具身和社会性三个维度共同影响联合行动中的表征过程, 即个体对联合行动任务的表征基于一种多重表征方式。

多重表征模型也可以解释动作共同表征和任务共同表征在联合行动中的作用。动作共同表征理论指出, 在联合行动中即使不要求考虑他人的动作, 他人的动作也会被个体表征并影响个体自身的动作(Sebanz et al., 2003)。由于动作具有可模拟的特征, 个体通过镜像神经网络表征同伴动作, 并在运动系统中激活相应动作(Tsai et al., 2008), 这种表征方式与多重表征模型具身维度的观点一致。任务共同表征是社会情境概念化的结果(Sebanz et al., 2005), 与搭档在任务中的角色相关(Ford & Aberdein, 2015), 可归纳于多重表征模型社会性维度。此外, 为完成具有不对称任务约束的任务(只有一方有任务约束)的时间协调, 不受任务约束的行动者共同表征了搭档的空间任务约束(障碍物), 以确保协作任务的完成(Schmitz et al., 2017)。此时个体通过具身模拟表征搭档在空间中面对的刺激, 即具身维度的表征促进了基于社会因素的空间信息表征。因此, 受约束的任务共同表征可以对应到多重表征模型的空间、具身和社会性维度的表征。

4.5 小结

综上所述, 本研究提出的人际协同的多重表征模型具备以下几个特点。第一, 可解释范围广, 新的理论能够广泛解释联合行动中个体表征的研究结果; 第二, 支持以往对联合行动中个体表征的主要理论观点; 第三, 可考虑推广应用到现实的联合行动或协同作业系统中。因此, 本研究提出的新的联合行动中人际协同的多重表征模型具有丰富的实证和理论依据, 可以系统合理地解释以往联合行动中个体协同与表征的相关研究结果, 并为未来开展协同作业系统中人际或人机协同与组队的研究提供理论支持。最后, 我们继续总结并探讨了人际协同的多重表征模型对于智能人机系统中人机协同与组队的借鉴意义。

5 应用与展望

如前文所述, 关于联合行动中人际协同主题

的研究数量众多且日趋成熟,近年来学者们除了关注其认知神经机制,也开始关注其在现实中的应用,如如何促进人际或人机协同以提高协同作业的绩效。这种发展趋势预示着当前迫切需要一个新的整合理论模型来解释联合行动中个体表征背后的机制,从而为联合行动绩效的提高提供理论依据。本研究在梳理以往理论和实证研究的基础上,提出人际协同的多重表征模型,该模型可帮助我们深入地理解和解释联合行动中操作者行为背后的表征过程和内容,促进未来智能人机交互研究的推进和完善,提升用户体验;同时围绕该模型的研究也可直接应用于协同作业系统的设计和优化,并最终为设计人-智能体协同作业系统提供科学基础。

5.1 模型的应用前景

人工智能(artificial intelligence)的发展正在催生越来越多样化的智能人机交互终端,日常工作和生活中的人机交互已经逐渐演变成人与各种带有自主化特征的智能机器人之间的交互(许为,葛列众,2020),未来人类与人工智能进行实际意义的协同将成为常态。对人与智能体之间如何协同的机制研究,也成为当前工程心理学等人因学科的重点研究领域之一(许为,葛列众,2018; Heard & Adams, 2019)。智能人机交互研究的是人与智能体如何像人与人一样协作,目标在于提升用户体验,通过探究人机关系与行为模式,最终实现人机交互界面(human machine interface, HMI)的优化及创新,以形成一个完整的智能人机交互框架(孙效华等,2020; Hornbæk et al., 2019)。然而当前智能人机交互的设计标准仍然不够具体化和系统化(许为,2019),如何使智能机器人像真正的人类一样与同伴协同,实时动态地情境感知,理解同伴的意图并完成特定的任务呢?社会技术大环境系统理论认为,应该从物理、社会以及人际等情境出发,从整体的系统设计和优化层面来研究人与人以及人与各种界面和智能体之间的交互(许为,2019)。多重表征模型的三个维度与该理论具有内在一致性。因此,联合行动中人际协同模式及结果或可为智能人机交互研究提供借鉴。

根据人际协同的多重表征模型,在设计智能交互产品或是在实际人机交互的过程中可以考虑从以下三个方面提升人机交互感受,从而提高用户体验。首先,人与机的空间位置关系作用于人

机交互效果。人对空间特征如空间位置、空间注意力的编码是本能自动地发生的(Porcu et al., 2016; Sun & Thomas, 2013),而人与智能体的空间接触和交互方式对用户体验有重要影响(兰玉琪,刘松洋,2020),因此,在设计智能人机交互产品时,首先应从空间维度上让人类主体/用户感到舒适,需要考虑机器外形、大小、与人类接触的方式等如何对人机交互模式起作用,并在比对之后确定最佳人机空间交互方式。以汽车导航系统为例,行车过程中驾驶员常借助实时导航系统完成驾驶任务。导航系统的呈现方式(二维或三维)及大小,与驾驶员的相对空间位置,都会影响驾驶员注意力的分配。因此,设计导航系统时要考虑到空间因素对驾驶绩效的影响。

其次,应该考虑人的具身特征(如个体与智能体接触的身体部位和接触姿势)对人机交互的影响(宋晓蕾等,2018; Gonzalez et al., 2011)。如汽车导航系统的界面设计也应该从具身的角度出发,考虑驾驶员的身高、利手和驾驶姿势习惯如何影响其对导航系统提供的信息的感知,从操作者自身视角出发增强其身体浸入感,以提高操作者的导航和寻路绩效。

最后,随着智能人机交互的多模态化,用户对于信息和服务的情景化需求提高,对智能人机交互过程中的情景可感知性也提出了更高的要求(许为,2022)。这与多重表征模型观点是一致的:同伴特征、社会环境等因素影响个体对协同情景的感知(郭人豪等,2020; Surtees et al., 2016),从而影响协同绩效。因此要尽可能使智能体具有社会性功能,如语言和交际功能(Cochet & Guidetti, 2018)、较高拟人化特征、较强的感知交互能力(兰玉琪,刘松洋,2020)。例如,汽车导航系统提供用户不同音色的语音系统,以及可以根据当地语言习惯切换的语言系统;向用户反馈实时道路和交通状况,都增加了与用户的情境交互。因而让用户感觉到智能机器能够像伙伴一般与自己进行互动和交流(Sahai et al., 2019),提升智能人机交互体验和效果。

目前人机交互研究的重点更多地关注了人机协同作业和人机组队(Peeters et al., 2021; Wynne & Lyons, 2018)。研究联合行动中人际协同的多重表征模型可为实际生活中的人际/人机协同绩效的提高提供参考,为智能人机交互产品的设计提供

思路。同时,联合行动相关研究有助于我们理解人机协同作业或者人机组队操作中,操作者所处情境及其表征对协同、组队操作的影响,研究成果可以直接应用于协同作业系统的设计和优化,并为建立自然高效人机协同和组队的交互模式提供科学的依据。

5.2 模型的优势和不足

首先,与以往理论的视角不同,本文基于表征视角提出人际协同的多重表征模型,系统地将联合行动绩效与个体内部及个体之间的表征编码方式结合起来,有利于了解个体行为背后表征内容的产生及作用的过程。根据该模型的观点,在联合行动或协同作业中,个体对共同行动者动作的表征方式与其所处的空间因素、具身特征以及社会性因素密切相关,其中个体表征他人的能力越强,与他人的协同绩效越好。因此,提高个体的表征能力,是提高联合行动任务绩效的关键。

其次,以往理论没有系统考虑实际的联合行动或人际协同系统中空间、具身、以及社会因素协同对行动绩效的交互影响,在解释联合行动中操作者间表征及行为表现时具有局限性。本文基于以往的理论和实证研究,整合空间、具身和社会性三个维度的表征及其作用,提出了多重表征理论模型。该模型能够更好地解释联合行动中操作者之间联合行动的机理以及种情境因素(物理、人际、社会)对任务绩效的影响。

再次,该模型对未来实证研究的开展提供了方向,在未来探究联合行动或团队协同作业相关研究时,可以从空间、具身和社会性表征三个维度来考察团队协作中的个体表征能力和任务表现,以进一步揭示个体行为背后的认知机制。

当然,该模型也需进一步的完善。一方面,该模型虽然基于以往研究论证了空间、具身和社会性表征对联合行动中的个体表征及协作表现产生影响,但对于空间、具身特征和社会性因素如何交互影响操作者表征能力和任务绩效,目前的实证研究证据仍需加强。未来还需要开展进一步的研究,以验证这三个维度是如何相互作用和融合的。另一方面,虽然本文主要分析了该模型能够解释联合 Simon 任务、联合 Flanker 任务、联合 SNARC 任务等人际协同任务中个体的表征过程。但不论在何种人际协同任务中,个体都必须与他人共同完成任务目标,他人的存在使个体需要利

用镜像神经元系统监控他人的动作和预测对方下一步动作以制定自己的动作计划,而对他人的运动预测离不开基于心理理论视角对他人空间信息的表征。因此,我们推测该模型可用于大多数人际协同任务。当然,未来仍需考察该模型如何推广到更广泛的人际协同任务范式。最后,该模型仅考虑了一般实验室控制条件对人际协同表征的影响,其他一些结合现实任务场景因素如特因环境对团队协同作业中操作者的表征及绩效的影响也有待进一步的探究。

参考文献

- 郭人豪,王婷,张积家.(2020).多元语言文化对个体情境下与社会情境下认知转换功能的差异性影响——来自锡伯族的证据.《心理学报》,52(9),1071-1086. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2020.01071>
- 兰玉琪,刘松洋.(2020).人工智能技术下的产品用户体验研究综述.《包装工程》,41(24),22-29. <https://doi.org/10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.24.004>
- 林琳琳,刘文,王薇薇,龚平.(2021).幼儿在联合行动中共同表征能力的发展.《心理科学》,44(1),60-66. <https://doi.org/10.16719/j.cnki.1671-6981.20210109>
- 刘亚,王振宏,孔风.(2011).情绪具身观:情绪研究的新视角.《心理科学进展》,19(1),50-59.
- 宋晓蕾.(2015).基于客体的空间一致性效应:功能可见性或空间位置编码?《心理科学》,38(5),1067-1073. <https://doi.org/10.16719/j.cnki.1671-6981.2015.05.008>
- 宋晓蕾,贾筱倩,赵媛,郭晶晶.(2020).情绪对联合行动中共同表征能力的影响机制.《心理学报》,52(3),269-282. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2020.00269>
- 宋晓蕾,李洋洋,杨倩,游旭群.(2018).反应手的不同状态对联合任务中观察学习的影响.《心理学报》,50(9),975-984. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2018.00975>
- 宋晓蕾,李洋洋,张诗熠,张俊婷.(2017).人际情境对幼儿联合 Simon 效应的影响机制.《心理发展与教育》,33(3),273-281. <https://doi.org/10.16187/j.cnki.issn1001-4918.2017.03.03>
- 宋晓蕾,王丹,张欣欣,贾筱倩.(2020).基于客体的一致性效应的产生机制.《心理学报》,52(6),669-681. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2020.00669>
- 孙效华,张义文,秦觉晓,李璟璐,王舒超.(2020).人机智能协同研究综述.《包装工程》,41(18),1-11. <https://doi.org/10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.18.001>
- 肖承丽,范丫,徐刘飞,周仁来.(2019).以人为中心的人-机器人自然空间语言交互.《应用心理学》,25(4),319-331.
- 肖承丽,隋雨繁,肖苏衡,周仁来.(2021).空间交互研究新视角:多重社会因素的影响.《心理科学进展》,29(5),796-805. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2021.00796>

- 徐胜, 宋晓蕾. (2016). 联合 Simon 效应: 现状、影响因素与理论解释. *心理科学进展*, 24(3), 367–378. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2016.00367>
- 许为. (2019). 四论以用户为中心的设计: 以人为中心的人工智能. *应用心理学*, 25(4), 291–305.
- 许为. (2022). 六论以用户为中心的设计: 智能人机交互的人因工程途径. *应用心理学*, 28(3), 195–213.
- 许为, 葛列众. (2018). 人因学发展的新取向. *心理科学进展*, 26(9), 1521–1534. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2018.01521>
- 许为, 葛列众. (2020). 智能时代的工程心理学. *心理科学进展*, 28(9), 1409–1425. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2020.01409>
- 杨帅, 黄希庭, 陈有国, 傅于玲, 刘孟超. (2014). 人际距离调节自我-他人的神经表征: 来自 oFRN 的证据. *心理学报*, 46(5), 666–676. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2014.00666>
- 叶浩生. (2014). “具身”涵义的理论辨析. *心理学报*, 46(7), 1032–1042. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2014.001032>
- 叶浩生. (2016). 镜像神经元的意义. *心理学报*, 48(4), 444–456. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2016.00444>
- Aron, A., McLaughlin-Volpe, T., Mashek, D., Lewandowski, G., Wright, S. C., & Aron, E. N. (2004). Including others in the self. *European Review of Social Psychology*, 15(1), 101–132. <http://doi.org/10.1080/10463280440000008>
- Astolfi, L., Toppi, J., Ciaramidaro, A., Vogel, P., Freitag, C. M., & Siniatchkin, M. (2020). Raising the bar: Can dual scanning improve our understanding of joint action? *Neuroimage*, 216, 116813. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116813>
- Atkinson, M. A., Simpson, A., Skarratt, P. A., & Cole, G. G. (2014). Is social inhibition of return due to action co-representation? *Acta Psychologica*, 150, 85–93. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.04.003>
- Atmaca, S., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2011). The joint flanker effect: Sharing tasks with real and imagined co-actors. *Experimental Brain Research*, 211(3–4), 371–385. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2709-9>
- Atmaca, S., Sebanz, N., Prinz, W., & Knoblich, G. (2008). Action co-representation: The joint SNARC effect. *Social Neuroscience*, 3(3–4), 410–420. <https://doi.org/10.1080/17470910801900908>
- Baess, P., & Prinz, W. (2015). My partner is also on my mind: Social context modulates the N1 response. *Experimental Brain Research*, 233(1), 105–113. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-4092-9>
- Baess, P., Weber, T., & Bermeitinger, C. (2018). Sharing different reference frames: How stimulus setup and task setup shape egocentric and allocentric Simon effects. *Frontiers in Psychology*, 9, 2063. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02063>
- Barchiesi, G., Zazio, A., Marcantoni, E., Bulgari, M., di San Pietro, C. B., Sinigaglia, C., & Bortoletto, M. (2022). Sharing motor plans while acting jointly: A TMS study. *Cortex*, 151, 224–239. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.03.007>
- Beaurenaud, M., Dezechache, G., & Grèzes, J. (2021). Action co-representation under threat: A social Simon study. *Cognition*, 215, 104829. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104829>
- Behrens, T. E. J., Hunt, L. T., & Rushworth, M. F. S. (2009). The computation of social behavior. *Science*, 324(5931), 1160–1164. <https://doi.org/10.1126/science.1169694>
- Bolt, N. K., & Loehr, J. D. (2017). The predictability of a partner's actions modulates the sense of joint agency. *Cognition*, 161, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.01.004>
- Bolt, N. K., & Loehr, J. D. (2021). The motor-related brain activity that supports joint action: A review. *Acta Psychologica*, 212, 103218. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2020.103218>
- Brunet, E., Sarfati, Y., Hardy-Baylé, M.-C., & Decety, J. (2000). A PET investigation of the attribution of intentions with a nonverbal task. *Neuroimage*, 11(2), 157–166. <https://doi.org/10.1006/nimg.1999.0525>
- Carpenter, M. (2009). Just how joint is joint action in infancy? *Topics in Cognitive Science*, 1(2), 380–392. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01026.x>
- Cerullo, S., Fulceri, F., Muratori, F., & Contaldo, A. (2021). Acting with shared intentions: A systematic review on joint action coordination in autism spectrum disorder. *Brain and Cognition*, 149(1), 105693. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2021.105693>
- Ciardo, F., & Wykowska, A. (2018). Response coordination emerges in cooperative but not competitive joint task. *Frontiers in Psychology*, 9, 1919. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01919>
- Cochet, H., & Guidetti, M. (2018). Contribution of developmental psychology to the study of social interactions: Some factors in play, joint attention and joint action and implications for robotics. *Frontiers in Psychology*, 9, 1992. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01992>
- Curioni, A., Vesper, C., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2019). Reciprocal information flow and role distribution support joint action coordination. *Cognition*, 187, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.02.006>
- Curtin, A., Tong, S., Sun, J., Wang, J., Onaral, B., & Ayaz, H. (2019). A systematic review of integrated functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) and transcranial magnetic stimulation (TMS) studies. *Frontiers in Neuroscience*, 13,

84. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00084>
- Czeszumski, A., Eustergerling, S., Lang, A., Menrath, D., Gerstenberger, M., Schubert, S., ... König, P. (2020). Hyperscanning: A valid method to study neural inter-brain underpinnings of social interaction. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 39. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00039>
- De Vicariis, C., Pusceddu, G., Chackochan, V. T., & Sanguineti, V. (2022). Artificial partners to understand joint action: Representing others to develop effective coordination. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30, 1473–1482. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2022.3176378>
- Dittrich, K., Dolk, T., Rothe-Wulf, A., Klauer, K. C., & Prinz, W. (2013). Keys and seats: Spatial response coding underlying the joint spatial compatibility effect. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75(8), 1725–1736. <https://doi.org/10.3758/s13414-013-0524-z>
- Dolk, T., Hommel, B., Colzato, L. S., Schütz-Bosbach, S., Prinz, W., & Liepelt, R. (2011). How "social" is the social Simon effect? *Frontiers in Psychology*, 2, 84. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00084>
- Dolk, T., Hommel, B., Colzato, L. S., Schütz-Bosbach, S., Prinz, W., & Liepelt, R. (2014). The joint Simon effect: A review and theoretical integration. *Frontiers in Psychology*, 5, 974. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00974>
- Ferraro, L., Iani, C., Mariani, M., Milanese, N., & Rubichi, S. (2011). Facilitation and interference components in the joint Simon task. *Experimental Brain Research*, 211(3–4), 337–343. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2711-2>
- Ford, R., & Aberdein, B. (2015). Exploring social influences on the joint Simon task: Empathy and friendship. *Frontiers in Psychology*, 6, 962. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00962>
- Gallese, V. (2006). Intentional attunement: A neurophysiological perspective on social cognition and its disruption in autism. *Brain Research*, 1079(1), 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.01.054>
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119(2), 593–609. <https://doi.org/10.1093/brain/119.2.593>
- Gonzalez, D. A., Studenka, B. E., Glazebrook, C. M., & Lyons, J. L. (2011). Extending end-state comfort effect: Do we consider the beginning state comfort of another? *Acta Psychologica*, 136(3), 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.12.009>
- Grynspan, O., Sahai, A., Hamidi, N., Pacherie, E., Berberian, B., Roche, L., & Saint-Bauzel, L. (2019). The sense of agency in human-human vs human-robot joint action. *Consciousness and Cognition*, 75, 102820. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2019.102820>
- Hamzei, F., Vry, M.-S., Saur, D., Glauche, V., Hoeren, M., Mader, I., ... Rijntjes, M. (2015). The dual-loop model and the human mirror neuron system: An exploratory combined fMRI and DTI study of the inferior frontal gyrus. *Cerebral Cortex*, 26(5), 2215–2224. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv066>
- Hartmann, M., Fischer, M. H., & Mast, F. W. (2019). Sharing a mental number line across individuals? The role of body position and empathy in joint numerical cognition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 72(7), 1732–1740. <https://doi.org/10.1177/1747021818809254>
- Heard, J., & Adams, J. A. (2019). Multi-dimensional human workload assessment for supervisory human-machine teams. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 13(3), 146–170. <https://doi.org/10.1177/1555343419847906>
- Hommel, B., Colzato, L. S., & van den Wildenberg, W. P. M. (2009). How social are task representations? *Psychological Science*, 20(7), 794–798. <https://doi.org/10.1111/J.1467-9280.2009.02367.X>
- Hopcroft, R. L. (2013). Neurosociology and theory of mind (ToM). In D. D. Franks & J. H. Turner (Eds.), *Handbook of Neurosociology* (pp. 231–241). New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4473-8_16
- Hornbæk, K., Mottelson, A., Knibbe, J., & Vogel, D. (2019). What do we mean by "interaction"? An analysis of 35 years of chi. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 26(4), 1–30. <https://doi.org/10.1145/3325285>
- Iacoboni, M. (2008). Imitation, empathy, and mirror neurons. *Annual Review of Psychology*, 60(1), 653–670. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.60.110707.163604>
- Iani, C., Anelli, F., Nicoletti, R., Arcuri, L., & Rubichi, S. (2011). The role of group membership on the modulation of joint action. *Experimental Brain Research*, 211(3–4), 439–445. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2651-x>
- Iani, C., Ciardo, F., Panajoli, S., Lugli, L. & Rubichi, S. (2019). The role of the co-actor's response reachability in the joint Simon effect: Remapping of working space by tool use. *Psychological Research*, 85(2), 521–532. <https://doi.org/10.1007/s00426-019-01271-6>
- Keller, P. E. (2012). Mental imagery in music performance: Underlying mechanisms and potential benefits. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252(1), 206–213. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06439.x>
- Keller, P. E., Novembre, G., & Hove, M. J. (2014). Rhythm in joint action: Psychological and neurophysiological mechanisms for real-time interpersonal coordination. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*:

- Biological Sciences*, 369(1658), 20130394. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0394>
- Kiernan, D., Ray, M., & Welsh, T. N. (2012). Inverting the joint Simon effect by intention. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(5), 914–920. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0283-1>
- Knoblich, G., & Sebanz, N. (2006). The social nature of perception and action. *Current Directions in Psychological Science*, 15(3), 99–104. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2006.00415.x>
- Knoblich, G., & Sebanz, N. (2008). Evolving intentions for social interaction: From entrainment to joint action. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1499), 2021–2031. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0006>
- Konvalinka, I., Bauer, M., Stahlhut, C., Hansen, L. K., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2014). Frontal alpha oscillations distinguish leaders from followers: Multivariate decoding of mutually interacting brains. *Neuroimage*, 94, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.03.003>
- Kourtis, D., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2013). Predictive representation of other people's actions in joint action planning: An EEG study. *Social Neuroscience*, 8(1), 31–42. <https://doi.org/10.1080/17470919.2012.694823>
- Li, J., Dong, S., Chiou, E. K., & Xu, J. (2020). Reciprocity and its neurological correlates in human-agent cooperation. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 50(5), 384–394. <https://doi.org/10.1109/THMS.2020.2992224>
- Liepelt, R., Klempova, B., Dolk, T., Colzato, L. S., Ragert, P., Nitsche, M. A., & Hommel, B. (2015). The medial frontal cortex mediates self-other discrimination in the joint Simon task: A tDCS Study. *Journal of Psychophysiology*, 30(3), 87–101. <https://doi.org/10.1027/0269-8803/a000158>
- Liu, T., Saito, G., Lin, C., & Saito, H. (2017). Inter-brain network underlying turn-based cooperation and competition: A hyperscanning study using near-infrared spectroscopy. *Scientific Reports*, 7(1), 8684. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09226-w>
- Loehr, J. D., Kourtis, D., Vesper, C., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2013). Monitoring individual and joint action outcomes in duet music performance. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(7), 1049–1061. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00388
- Loehr, J. D., & Vesper, C. (2016). The sound of you and me: Novices represent shared goals in joint action. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69(3), 535–547. <https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1061029>
- Meagher, B. R., & Marsh, K. L. (2014). The costs of cooperation: Action-specific perception in the context of joint action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(1), 429–444. <https://doi.org/10.1037/a0033850>
- Michael, J., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2016). Observing joint action: Coordination creates commitment. *Cognition*, 157, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.08.024>
- Milward, S. J., Kita, S., & Apperly, I. A. (2014). The development of co-representation effects in a joint task: Do children represent a co-actor? *Cognition*, 132(3), 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.04.008>
- Novembre, G., Ticini, L. F., Schütz-Bosbach, S., & Keller, P. E. (2014). Motor simulation and the coordination of self and other in real-time joint action. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 9(8), 1062–1068. <https://doi.org/10.1093/scan/nst086>
- Peeters, M. M. M., van Diggelen, J., van den Bosch, K., Bronkhorst, A., Neerinx, M. A., Schraagen, J. M., & Raaijmakers, S. (2021). Hybrid collective intelligence in a human-AI society. *AI & SOCIETY*, 36(1), 217–238. <https://doi.org/10.1007/s00146-020-01005-y>
- Pérusse-Lambert, A., Anastassova, M., Boukallel, M., Chetouani, M., & Grynszpan, O. (2019). The social Simon effect in the tactile sensory modality: A negative finding. *Cognitive Processing*, 20(3), 299–307. <https://doi.org/10.1007/s10339-019-00911-4>
- Pesquita, A., Whitwell, R. L., & Enns, J. T. (2018). Predictive joint-action model: A hierarchical predictive approach to human cooperation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(5), 1751–1769. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1393-6>
- Porcu, E., Bölling, L., Lappe, M., & Liepelt, R. (2016). Pointing out mechanisms underlying joint action. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(4), 972–977. <https://doi.org/10.3758/s13414-016-1093-8>
- Quintard, V., Jouffre, S., Croizet, J.-C., & Bouquet, C. A. (2020). The influence of passionate love on self-other discrimination during joint action. *Psychological Research*, 84(1), 51–61. <http://doi.org/10.1007/s00426-018-0981-z>
- Roberts, J. W., Maiden, J., & Lawrence, G. P. (2021). Sequential aiming in pairs: The multiple levels of joint action. *Experimental Brain Research*, 239(5), 1479–1488. <https://doi.org/10.1007/s00221-021-06060-5>
- Ruys, K. I., & Aarts, H. (2010). When competition merges people's behavior: Interdependency activates shared action representations. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46(6), 1130–1133. <http://doi.org/10.1016/j.jesp.2010.05.016>
- Sahaï, A., Desantis, A., Grynszpan, O., Pacherie, E., & Berberian, B. (2019). Action co-representation and the sense of agency during a joint Simon task: Comparing human and machine co-agents. *Consciousness and Cognition*, 67, 44–55. <http://doi.org/10.1016/j.concog.2018.11.008>
- Sahaï, A., Pacherie, E., Grynszpan, O., & Berberian, B.

- (2017). Predictive mechanisms are not involved the same way during human-human vs. human-machine interactions: A review. *Frontiers in Neurobotics*, 11, 52. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2017.00052>
- Schmitz, L., Vesper, C., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2017). Co-representation of others' task constraints in joint action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(8), 1480–1493. <http://doi.org/10.1037/xhp0000403>
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: Bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(2), 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.12.009>
- Sebanz, N., & Frith, C. (2004). Beyond simulation? Neural mechanisms for predicting the actions of others. *Nature Neuroscience*, 7(1), 5–6. <https://doi.org/10.1038/nn0104-5>
- Sebanz, N., & Knoblich, G. (2009). Prediction in joint action: What, when, and where. *Topics in Cognitive Science*, 1(2), 353–367. <https://doi.org/10.1111/J.1756-8765.2009.01024.X>
- Sebanz, N., Knoblich, G., & Prinz, W. (2003). Representing others' actions: Just like one's own? *Cognition*, 88(3), B11–B21. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(03\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00043-X)
- Sebanz, N., Knoblich, G., & Prinz, W. (2005). How two share a task: Corepresenting stimulus-response mappings. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(6), 1234–1246. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.6.1234>
- Sebanz, N., Knoblich, G., Prinz, W., & Wascher, E. (2006). Twin peaks: An ERP study of action planning and control in coacting individuals. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(5), 859–870. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.5.859>
- Sebanz, N., Rebbechi, D., Knoblich, G., Prinz, W., & Frith, C. D. (2007). Is it really my turn? An event-related fmri study of task sharing. *Social Neuroscience*, 2(2), 81–95. <https://doi.org/10.1080/17470910701237989>
- Sellaro, R., Dolk, T., Colzato, L. S., Liepelt, R., & Hommel, B. (2015). Referential coding does not rely on location features: Evidence for a nonspatial joint Simon effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 41(1), 186–195. <http://doi.org/10.1037/a0038548>
- Sinigaglia, C., & Butterfill, S. A. (2020). Motor representation and action experience in joint action. In A. Fiebich (Ed.), *Minimal cooperation and shared agency* (pp. 181–193). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29783-1_11
- Sun, H.-M., & Thomas, L. E. (2013). Biased attention near another's hand following joint action. *Frontiers in Psychology*, 4, 443. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00443>
- Surtees, A., Apperly, I., & Samson, D. (2016). I've got your number: Spontaneous perspective-taking in an interactive task. *Cognition*, 150, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.01.014>
- Tsai, C.-C., Kuo, W.-J., Hung, D.-L., & Tzeng, O. J. L. (2008). Action co-representation is tuned to other humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(11), 2015–2024. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20144>
- van der Weiden, A., Aarts, H., Prikken, M., & van Haren, N. E. M. (2016). Individual differences in action co-representation: Not personal distress or subclinical psychotic experiences but sex composition modulates joint action performance. *Experimental Brain Research*, 234(2), 499–510. <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4475-6>
- van der Weiden, A., Porcu, E., & Liepelt, R. (2022). Action prediction modulates self-other integration in joint action. *Psychological Research*, 87(2), 537–552. <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01674-y>
- Vesper, C., Butterfill, S., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2010). A minimal architecture for joint action. *Neural Networks*, 23(8–9), 998–1003. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2010.06.002>
- Vesper, C., van der Wel, R. P. R. D., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2013). Are you ready to jump? Predictive mechanisms in interpersonal coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(1), 48–61. <https://doi.org/10.1037/a0028066>
- Wenke, D., Atmaca, S., Holländer, A., Liepelt, R., Baess, P., & Prinz, W. (2011). What is shared in joint action? Issues of co-representation, response conflict, and agent identification. *Review of Philosophy & Psychology*, 2(2), 147–172. <https://doi.org/10.1007/s13164-011-0057-0>
- Wilson, M., & Knoblich, G. (2005). The case for motor involvement in perceiving conspecifics. *Psychological Bulletin*, 131(3), 460–473. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.3.460>
- Wolf, W., Launay, J., & Dunbar, R. I. M. (2016). Joint attention, shared goals, and social bonding. *British Journal of Psychology*, 107(2), 322–337. <https://doi.org/10.1111/bjop.12144>
- Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1431), 593–602. <https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1238>
- Wynne, K. T., & Lyons, J. B. (2018). An integrative model of autonomous agent teammate-likeness. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 19(3), 353–374. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2016.1260181>
- Yang, Q., Song, X., Dong, M., Li, J., & Proctor, R. W. (2021). The Underlying neural mechanisms of interpersonal

situations on collaborative ability: A hyperscanning study
using functional near-infrared spectroscopy. *Social*

Neuroscience, 16(5), 549–563. <https://doi.org/10.1080/17470919.2021.1965017>

A multidimensional representation model of interpersonal collaboration: From the perspective of cognitive representation

SONG Xiaolei, DONG Meimei

*(School of Psychology, Shaanxi Normal University & Key Laboratory of Behavioral and Cognitive
Neuroscience of Shaanxi Province, Xi'an 710062, China)*

Abstract: Joint action is a common form of interpersonal interaction in our daily life. Successful joint action depends on effective collaboration between individuals, and the co-representation ability is the basis of such interpersonal collaboration. However, how humans represent behaviors of self and others and act during joint action, is still vague. From the perspective of cognitive representation, research concerning the representation process and mechanism of joint action and related theories were systematically reviewed, and based on this, a multidimensional representation model of joint action was proposed. The model explored the process and content of collaboration between individuals in joint actions from three dimensions: spatial dimension, embodied dimension and social dimension. The implication of this model for intelligent human-computer interaction was also discussed.

Keywords: joint action, co-representation, multi-representative model, interpersonal collaboration, human-computer interaction