

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：听障和听力正常人群空间主导性和空间参照框架的交互作用

作者：王爱君;沈路;迟莹莹;刘晓乐;陈骐;张明

第一轮

审稿人 1 意见：本探究考察目的明确，立意较新。

意见 1：实验 2 没有具体提到被试离开目标远近的空间距离（即控制‘远近空间’），而且在任务上是否是实验 1 的良好控制，需要加以阐述。另外，实验 2 需要汇报 10 种不同位置的行为结果。

回应：实验 2 为实验 1 的控制实验，目的在于排除实验 1 中听障被试和听力正常被试在以自我参照判断任务中的差异是由于两者基本的本体平衡能力上的差异造成的(详见下面介绍)。因此，实验 2 中采用的实验设计和实验装置与实验 1 是不同的，实验 2 不涉及目标是否在远近空间。被试仅需要在看不见自己手的情况下(限制使用背侧通路)对前方出现的“点”进行追随反应。实验 2 采用的实验装置和实验材料的参数均在文中做出了交代。

有研究表明，先天听障被试对于运动刺激产生了外周视野活动的增强。如，当目标的时间或空间属性不确定时，相对于听力正常被试，听障被试对外周视野呈现的运动刺激反应更快且更准确(Stevens & Neville, 2006)。但是对于中央视野呈现的刺激，听力正常被试与听障被试的表现不存在显著差异(Bavelier et al., 2006)。此外，听障被试背侧通路的视觉运动区对于外周视野出现的刺激表现出更高的激活，而听力正常被试背侧通路的视觉运动区对中央视野出现的刺激有着更大的激活(Bavelier et al., 2001)。现有神经层面的证据表明，视觉运动刺激的加工(Beauchamp et al., 1997; O’Craven et al., 1997)和外周视野刺激的加工(Clavagnier et al., 2007; Prado et al., 2005)均由背侧通路负责，上述的一些研究也表明，听障人群背侧通路的视觉功能更易受影响而具有可塑性的变化(Bavelier et al., 2001; Bavelier & Neville, 2002; Lomber et al., 2010)。因此可以推测，对于听障被试而言，由于其视觉加工的背侧通路具有可塑性的变化，可能会影响他们对于出现在近处空间客体的表征方式，也可能会影响他们在不同空间主导性和不同空间参照框架的交互作用。

也有研究认为，先天性的耳聋会引起前庭蜗神经的部分损伤，不仅包括耳蜗功能，还包括前庭传入。而前庭传入纤维的破坏是引起平衡缺陷的原因之一(Siegel et al., 1991)，因为前庭信息对空间朝向非常重要(知觉我们的头和身体相对于外部世界的位置)。所以，听障人群的本体平衡感可能比正常人差(Angelaki et al., 2009)。当听障被试进行空间参照框架的判断时，可能会表现出对以自我参照框架下位置的感觉能力本身就存在缺陷。

本研究旨在考察早期听力剥夺人群是否因其背侧通路的改变而影响了其在近空间表征，以及他们的空间主导和空间参照框架的交互作用是否也发生了改变。因此，研究要控制“听障人群的本体平衡感可能比正常人差”对实验结果造成的影响，我们在实验 2 中采用了 open loop 实验范式考察听障和听力正常被试在有限使用背侧通路时，他们空间判断能力的差异。有研究在猴子的背侧通路中与够取和抓握反应相关的区域发现了编码手的位置反馈信息的神经元(Galletti et al., 2003; Galletti et al., 2005; Pitzalis et al., 2013)。因此，在够取和抓握行为中，对手的位置进行实时的视觉加工可能依赖于背侧通路。采用 fMRI 技术通过比较 close-loop 条件下(伸手时能看到自己的手)和 open-loop 条件下(看不到自己手的位置)的够取

和抓握行为,可以考察人类是否也存在类似的够取和抓握区域来调节对手的视觉反馈,并且已有研究发现,视觉运动区和上枕皮层参与对手的运动视觉反馈,而这些区域都位于背侧通路(Thaler & Goodale, 2011)。

本研究采用的open loop实验装置是要求被试正直地坐在桌子前,身体中线对着镜子中的中线,眼睛看向镜子里的目标,并确保被试不能看到自己的手。将被试用来指出目标位置的手指绑上棉签,其中左侧目标对应左手,蘸上黑墨水。右侧目标对应右手,蘸上红墨水。一半被试先用左手追随左侧目标,后用右手追随右侧目标,另一半被试则反过来,达到被试间平衡。实验中要求被试尽可能准确地指出目标的位置,确定目标的位置后就用手上的棉签点在纸上相应的位置,时间上不做限制。因此,手的移动主要是依赖于目标相对于被试以自我参照进行判断的位置上。

尽管在open loop任务中要判断的位置也是以自我参照判断下的坐标,但由于没有身体运动的视觉反馈,因而主要靠被试的本体平衡感。实验2(控制实验)表明,听障被试和听力正常被试在基本的本体平衡能力上没有差异,因而实验1两类被试在以自我参照判断任务中的差异可以排除这个影响。另外,针对之前提及的,对手的位置编码可能与背侧通路有关,在open loop实验中,由于看不到手的位置,因而可以控制背侧通路相应区域的参与。所以,尽管听障人群的背侧通路有所改变,但在该实验中背侧通路似乎没有起到足够大的作用导致与正常人群差异,说明了在控制了背侧通路表征的条件下,听障和听力正常被试自我参照框架下的任务表现差异并不显著,从侧面佐证了听障被试因背侧通路改变而导致的自我参照框架的变化。

考虑到文章整体版面的情况,实验2中10种不同位置的结果(图S1),我们以补充材料的形式呈现在文章后面:

将计算手指追踪的目标位置与实际位置(1-10)的偏差进行2(被试类型:听障人群 vs.听力正常人群) \times 2(反应手:左手 vs.右手)的重复测量方差分析。位置1的结果发现,只有反应手的主效应接近显著, $F(1,16)=3.90, p=0.06, \eta^2=0.20$,表明了左手的偏差(40mm)大于右手的偏差(31mm),其他主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$;位置2的结果发现,所有主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$;位置3的结果发现,只有反应手的主效应接近显著, $F(1,16)=4.35, p < 0.05, \eta^2=0.22$,表明了左手的偏差(35mm)大于右手的偏差(28mm),其他主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$;位置4的结果发现,只有反应手的主效应接近显著, $F(1,16)=12.03, p < 0.005, \eta^2=0.43$,表明了左手的偏差(37mm)大于右手的偏差(26mm),其他主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$;位置5的结果发现,只有反应手的主效应接近显著, $F(1,16)=8.01, p < 0.05, \eta^2=0.33$,表明了左手的偏差(36mm)大于右手的偏差(28mm),其他主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$;位置6的结果发现,只有反应手的主效应接近显著, $F(1,16)=6.65, p < 0.05, \eta^2=0.29$,表明了左手的偏差(37mm)大于右手的偏差(28mm),其他主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$;位置7的结果发现,只有反应手的主效应接近显著, $F(1,16)=16.56, p = 0.001, \eta^2=0.51$,表明了左手的偏差(40mm)大于右手的偏差(27mm),其他主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$;位置8的结果发现,只有反应手的主效应接近显著, $F(1,16)=25.96, p < 0.001, \eta^2=0.62$,表明了左手的偏差(38mm)大于右手的偏差(27mm),其他主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$;位置9的结果发现,只有反应手的主效应接近显著, $F(1,16)=5.21, p < 0.05, \eta^2=0.25$,表明了左手的偏差(38mm)大于右手的偏差(30mm),其他主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$;位置10的结果发现,只有反应手的主效应接近显著, $F(1,16)=4.42, p < 0.05, \eta^2=0.22$,表明了左手的偏差(37mm)大于右手的偏差(30mm),其他主效应和交互作用都不显著, $p > 0.05$ 。

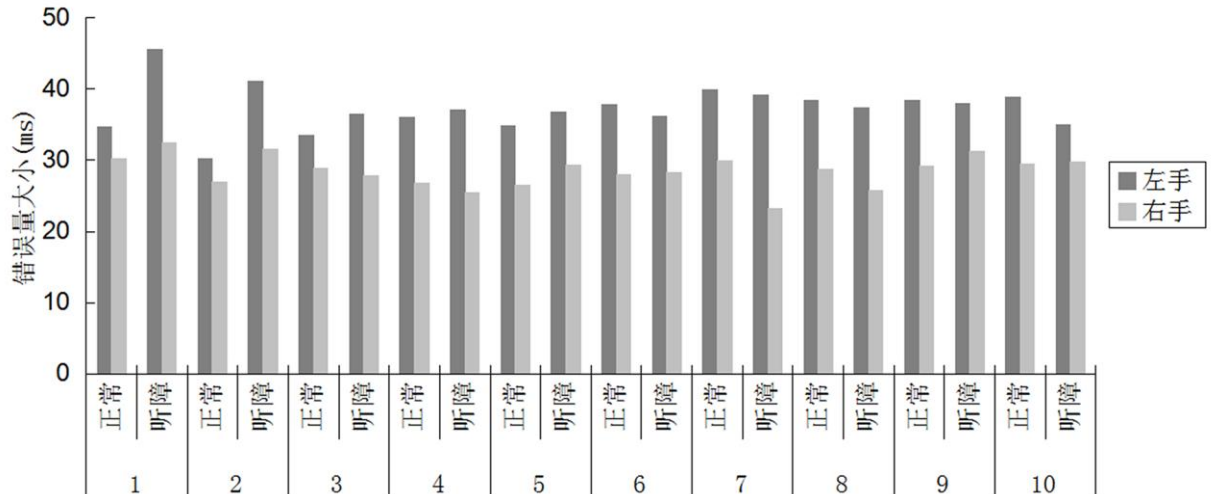


图 S1 实验 2 中 10 种不同位置的结果

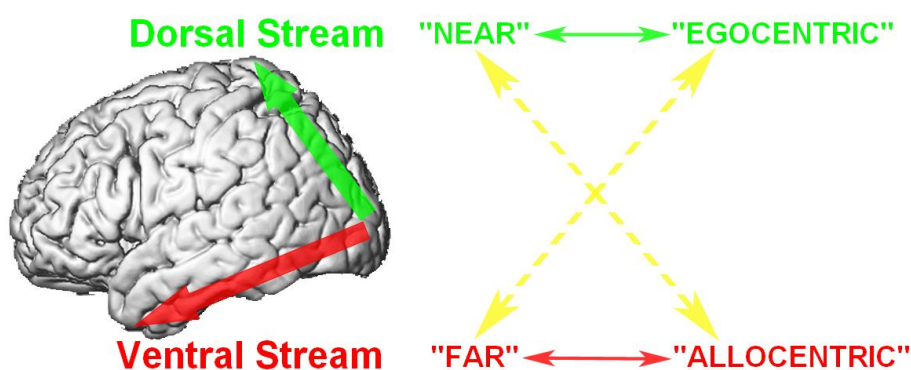
意见 2: 在开篇部分，作者提到了知觉-反应的腹侧和背侧通道在自我表征以及在远近空间表征上的功能差异，那么，在正文的两个实验任务中，是如何离析这‘自我’与‘远近’这两个因素的？

回应: 已有研究发现，视觉信息的皮层加工至少存在两条分离性的神经通路(Ungerleider & Mishkin, 1982): 一条是从初级视觉皮层出发沿着背侧方向到达顶叶的背侧通路; 另一条也是从初级视觉皮层出发沿着腹侧方向到达颞叶的腹侧通路。腹侧通路主要负责对客体属性的知觉，将视觉输入转换为知觉表征，包括客体的固有特征以及它们的空间关系。而背侧通路主要负责对客体施以行为动作，如够取和抓握环境中的客体(Griffiths et al., 2012; Kim, 2013; Vossel et al., 2012)。知觉反应模型的观点认为，对手臂范围内(近处空间)和手臂范围外(远处空间)的注意是基于不同的大脑信息加工通路(Berti & Frassinetti, 2000; Christiansen et al., 2014; Gilet et al., 2011; Haazebroek et al., 2011; Mennemeier et al., 1992; Vuilleumier et al., 1998)。因为个体可以对近处空间的客体直接地施以行为动作，因此，背侧通路负责近处空间的加工。相反，出现在远处空间的客体，个体无法直接地对其施以行为动作，因此，腹侧通路负责对出现在远处空间的客体进行知觉表征。

然而，有研究表明，无论是知觉任务还是反应任务，只要出现在近处空间时就由背侧通路负责加工，而出现在远处空间时就由腹侧通路负责加工(Weiss et al., 2003)。这些结果表明了，背侧通路和腹侧通路在近处和远处空间表现出的不同激活模式本质上并不是依赖于任务需求(如，知觉或者反应)(Pitzalis et al., 2001)，而是依赖于一个关键性的因素，即背侧通路与腹侧通路的功能分离是与选择了合适的空间参照框架相关(Bruno, 2001)。在大脑中，一个客体既可以以自我参照框架的形式呈现(如，相对于观察者的身体或者身体效应器)也可以以环境参照框架的形式呈现(如，相对于另一个客体或者与观察者无关的周围事物)(Jiang & Swallow, 2013; Viarouge et al., 2014; Vogeley & Fink, 2003)。自我表征通常是背侧通路将其转化为相应的感觉运动表征(Andersen & Buneo, 2002; Andersen et al., 1997; Cohen & Andersen, 2002; Ma et al., 2012)。而环境表征则通常是由腹侧通路将其转化为相应的知觉表征(James et al., 2003; James et al., 2002)。

本研究将空间主导性(近处 vs. 远处)与空间参照框架(自我参照 vs. 环境参照)相结合，目的在于考察听障人群中这两种维度之间潜在的交互作用。此外，我们将听障人群与听力正常人群两组被试的成绩进行比较，有利于考察以上两种维度的交互作用是否在听力丧失之后会发生改变。研究选取了听力障碍和听力正常两类被试，实验 1 同时操纵空间主导性(近处 vs.

远处)与空间参照框架(自我参照 vs.环境参照), 要求被试分别在近处空间和远处空间做自我参照或环境参照框架判断。实验因此分为了“近处自我参照”(绿色标明)、“远处环境参照”(红色标明)、“近处环境参照”(黄色标明)以及“远处自我参照”(黄色标明)四种实验条件(如下图所示)。其中“近处自我参照”条件依赖背侧通路, “远处环境参照”条件依赖腹侧通路, 而黄色线条标明的“近处环境参照”和“远处自我参照”条件则会存在“冲突”, 因此需要背腹侧通路的信息进行互相交换。而本研究的目的是考察听障人群中这两种维度之间潜在的交互作用以及这两种维度的交互作用是否在听力丧失之后会发生改变。而本实验 2 则是一个控制实验, 目的是为了排除实验 1 中听障被试和听力正常被试在以自我参照判断任务中的差异可以排除两者在基本的本体平衡能力上的差异造成的影响 (具体见问题 1 的说明)。



审稿人 2 意见: 该研究立论清晰, 通过实验考察了听障和听力正常人群在空间主导性和空间参照框架的交互作用, 有一定的理论意义。问题与建议:

意见 1: 在文章的不同部分, 作者对听障人群有断断续续的描述, 如“听障人群背侧通路功能发生了改变”、“有研究认为, 听障人群的本体感觉存在着缺陷”, 等等, 请在前言部分对“听障人群”作一个综合的描述;

回应: 根据审稿专家的意见, 我们在前言部分的第四段补充了相关内容, 对听障人群的视知觉加工特点作出了综合性的描述(文中蓝色字体标明)。

意见 2: 在实验一, 听障被试剔除的试次占总试次的 18.6%, 为何这么高, 会影响结果吗?

回应: 由于听障被试在完成实验的过程中, 需要主试和一名手语老师共同对其进行实验前的指导。虽然经过一段时间的练习, 听障被试能够理解实验的要求, 能够按照主试的实验要求完成实验任务。但是听障被试仍然属于特殊人群, 由于实验设置上远近空间是以 block 的方式呈现, 因此需要他们在远近空间内不断转换。所以, 他们的转换反应的能力相对于正常被试来说还是存在差异, 因此, 错误的试次也相对较多。但是, 本实验每个条件下的试次数量设置的足够多, 每个实验条件下均有 176 个试次。即使听障被试剔除试次占总试次的 18.6%, 这样平均每个条件剔除的试次约为 33 个试次, 而每个实验条件还剩余 143 个试次。我们认为 140 多个数据的平均值仍然具有代表性。

意见 3: “听障人群背侧通路功能发生了改变, 为了排除这个影响, 我们采用 open-loop 实验范式进行了控制实验来考察听障和听力正常被试在限制使用背侧通路时的空间判断能力是否存在差异”, open-loop 范式能“限制使用背侧通路”的依据是什么?

回应：在够取和抓握行为中，对手的位置实时的视觉加工也可能是依赖于背侧通路的机制，尽管并没有来自视觉共济失调病人的直接证据。然而，有研究在猴子的背侧通路中与够取相关的区域，发现了编码这种手的位置反馈信息的神经元(Galletti et al., 2003; Galletti et al., 2005; Pitzalis et al., 2013)。通过比较 closed-loop 条件下(伸手时能看到自己的手)与 open-loop 条件下(看不到自己手的位置)的够取，结合 fMRI 可以考察人类是否存在类似的够取区域调节对手的视觉反馈的使用。已有相关研究发现，视觉运动区 MT+和上顶枕皮层(superior parietal-occipital cortex,SPOC)参与对手的运动视觉反馈，这些都在背侧通路上(Thaler & Goodale, 2011)。

open-loop的实验装置见文中图4。实验过程中要求被试正直地坐在桌子前，身体中线对着镜子中的中线，眼睛看向镜子里的目标，并确保被试不能看到自己的手(由于参与对手的运动视觉反馈的脑区都位于背侧通路，实验中看不到手的运动，就实现不了对手运动的视觉反馈，因此也就限制使用了背侧通路)。将被试用来指出目标位置的手指绑上棉签，其中左侧目标对应左手，蘸上黑墨水。右侧目标对应右手，蘸上红墨水。一半被试先用左手追随左侧目标，后用右手追随右侧目标，另一半被试则反过来，达到被试间平衡。实验中要求被试尽可能准确地指出目标的位置，确定目标的位置后就用手上的棉签点在纸上相应的位置，时间上不做限制。因此，手的移动主要是依赖于目标相对于被试以自我参照进行判断的位置上。

意见 4：“听障人群的本体平衡感可能比正常人差，即对以自我参照框架下位置的感觉能力本身就存在缺陷”，这有依据吗？；

回应：有研究认为，先天性的耳聋会引起前庭蜗神经的部分损伤，不仅包括耳蜗功能，还包括前庭传入。而前庭传入纤维的破坏是引起平衡缺陷的原因之一(Siegel et al., 1991)，因为前庭信息对空间朝向非常重要(知觉我们的头和身体相对于外部世界的位置)。所以，听障人群的本体平衡感可能比正常人差(Angelaki et al., 2009)。当听障被试进行空间参照框架的判断时，可能会表现出对以自我参照框架下位置的感觉能力本身就存在缺陷(因为前庭信息对于知觉我们的头和身体相对于外界世界的位置非常重要，而自我参照框架的判断正是需要观察者判断，相对于观察者的身体或者身体效应器而言外界事物的位置，所以听障人群的本体平衡感可能比正常人差，即对以自我参照框架下位置的感觉能力本身就存在缺陷)。

意见 5：结论“听障人群和听力正常人群空间主导性和空间参照框架交互作用呈现出相反模式”，有什么理论意义？

回应：知觉反应模型的观点认为，对手臂范围内(近处空间)和手臂范围外(远处空间)的注意是基于不同的大脑信息加工通路(Berti & Frassinetti, 2000; Christiansen et al., 2014; Gilet et al., 2011; Haazebroek et al., 2011; Mennemeier et al., 1992; Vuilleumier et al., 1998)。个体可以对近处空间的客体直接地施以行为动作，因此，背侧通路负责近处空间的加工。相反，出现在远处空间的客体，个体无法直接地对其施以行为动作，因此，腹侧通路负责对出现在远处空间的客体进行知觉表征。也有研究的结果表明，背侧通路和腹侧通路在近处和远处空间表现出的不同激活模式本质上并不是依赖于任务需求(Pitzalis et al., 2001)，而是依赖于一个关键性的因素，即背侧通路和腹侧通路的功能分离是与选择了合适的空间参照框架相关(Bruno, 2001)。在大脑中，一个客体既可以以自我参照框架的形式呈现也可以以环境参照框架的形式呈现(Jiang et al., 2014; Vogeley & Fink, 2003)。自我表征是通常是由背侧通路将其转化为相应的感觉运动表征(Andersen & Buneo, 2002; Andersen et al., 1997; Cohen & Andersen, 2002; Ma et al., 2012)。而环境表征则通常是由腹侧通路将其转化为相应的知觉表征(James et al., 2003; James et al., 2002)。以往采用正常听力群体为被试的研究表明，当腹侧通路负责的知觉表征与背侧通路负责的感觉运动表征存在交互作用时，顶枕联合区(parietal occipital junction,

POJ)产生了更高的激活。并且认为,顶枕联合区参与了背侧通路 & 腹侧通路交互作用的神经表征(Chen et al., 2012)。而听障人群背侧通路的改变使得自我参照框架的表征以及近处空间加工的特征受损,进而表现出了与听力正常被试不一致的交互模式。因此,我们的研究可以预测,听障被试腹侧通路负责的知觉表征与背侧通路负责的感觉运动表征交互作用在神经机制层面也存在差异,甚至导致大脑的背腹侧脑区在处理日常生活中所处的三维环境的近处和远处空间的客体信息与空间参照框架相结合的任务中的连通性存在差异。

意见 6: “在近空间条件下,两者的差异更大一些”(p12, 倒数 1 行), 请作统计分析;

回应: 我们对此进行了统计分析, 发现两者之间存在显著差异 $t(16) = 2.20, p < 0.05, d = 0.77$ (已在文中补充)。

意见 7: 一些文句的表述有错误, 如“空间主导性和任务类型的主效应显著均布显著”(p7、11 行)、“空间主导性的主效应不显著”(p7、倒数 9 行)。

回应: 感谢审稿专家指出的问题。由于我们的疏忽导致表述有误之处, 我们在文中已做出了改正。

第二轮

审稿人 1 意见: 在实验二, “实验过程中确保被试不能看到自己的手, 由于参与对手的运动视觉反馈的脑区都位于背侧通路, 实验中看不到手的运动, 就实现不了对手运动的视觉反馈, 因此也就限制使用了背侧通路”。这里的论述逻辑有问题。背侧通路既是视觉反馈的通路, 也是触觉/本体感觉反馈的通路, 被试看不见自己的手, 并未意味着背侧通路被限制使用了(Milner et al., 2012; Whitwell & Buckingham, 2013)。即使看不见的视觉客体, 只要有触觉反馈, 也能促进抓握行为(Bruno & Franz, 2009; Franz, Hesse, & Kollath, 2009)。另外, 即使背侧通路被抑制, 实验没采取系统性变化参数的设计, 因此是否存在两个通路的转换(Post & Welch, 1996), 也不得而知。从目前的设计看, 我们尚不清楚听障被试的触觉反馈与正常被试的触觉反馈的对比情况, 以及针对听障被试的可能较优的触觉通道对视觉信息的“补偿”作用。因此, 实验二的任务逻辑和结果讨论略欠缜密, 需要加强。

回应: 文中“实验过程中确保被试不能看到自己的手, 由于参与对手的运动视觉反馈的脑区都位于背侧通路, 实验中看不到手的运动, 就实现不了对手运动的视觉反馈, 因此也就限制使用了背侧通路”这样的表述不严谨。根据审稿专家提供的相关文献, 我们对此进行了修改: “实验过程中确保被试不能看到自己的手, 由于参与对手的运动视觉反馈的脑区都位于背侧通路, 实验中看不到手的运动就实现不了对手运动的视觉反馈。此外, 背侧通路既是视觉反馈的通路, 也是触觉/本体感觉反馈的通路(Milner et al., 2012; Whitwell & Buckingham, 2013)。有研究认为, 被试即使看不到视觉客体, 只要有触觉反馈, 也能够促进抓握行为(Bruno & Franz, 2009; Franz, Hesse, & Kollath, 2009)。但在本实验中并未给予被试包含位置信息的触觉反馈, 在这过程中被试也不能根据触碰的位置调整判断, 因为被试在完成“点”追随任务后也不知道是否准确。因此, 是没有所谓的触觉反馈信息对任务判断造成的影响。所以, 即使听障和听力正常人群的触觉反馈通路存在差异, 但在本任务中, 触觉并未对任务判断产生作用。所以, 通过 open loop 实验的设计和装置使得被试在完成实验任务时既没有视觉反馈也没有触觉反馈(一定程度上限制了背侧通路的使用), 而完全依赖于本体的主观感觉。

为了更加清晰地说明 open loop 的实验过程, 下图给出了实验装置图(左上图)。实验过程中, 被试需将手臂至于镜子下方的箱子内, 确保被试在实验过程中不能看到自己的手臂。

实验过程中被试需要根据镜子中先后出现的“点”进行追随反应，即看到一个“点”后就在箱子底部的白纸上，与镜子中出现的“点”的位置所对应的位置点一下(被试的食指绑有沾了墨水棉签)。在实验过程中在箱子左侧开口位置的外侧放有摄像头，以便记录整个“点”追随反应的过程。因此，open loop 实验的完成过程既没有根据视觉反馈也没有根据触觉反馈的位置信息来调整判断，也就是在一定程度上限制了被试在完成与位置信息相关的任务过程中(点追随反应)使用背侧通路，仅仅需要靠被试的自体主观平衡感来完成实验任务。

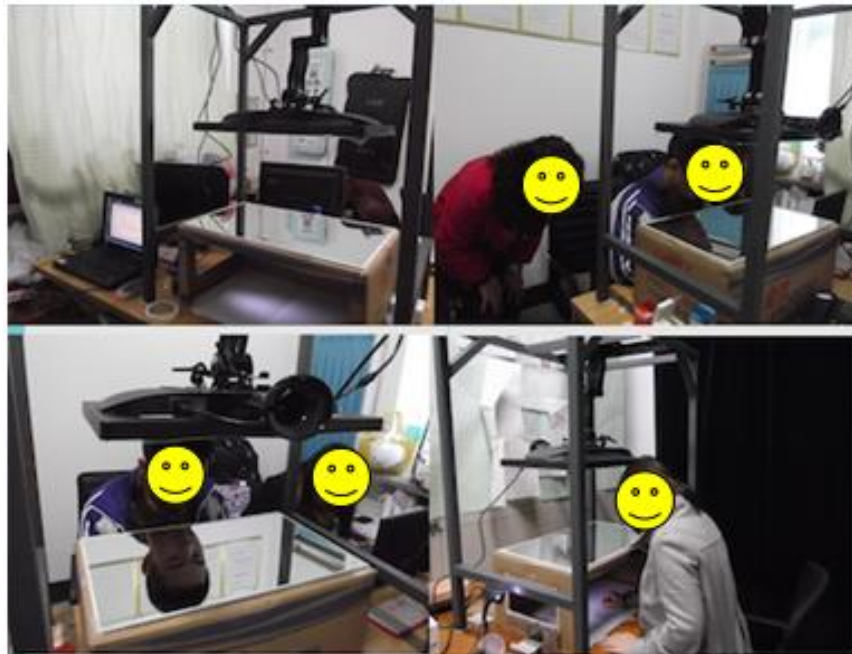


图 open loop 实验图(左上为实验装置图；右上为听障被试在主试和手语老师共同指导下进行练习实验；左下为听障被试在注视的监督下完成实验；右下为实验过程展示)。

审稿人 2 意见：

意见 1：作者通过“open-loop 范式”来“限制使用背侧通路”。但是，“背侧通路”不是孤立的，因此“被试不能看到自己的手”就一定能限制对背侧通路的使用？这一假设在该研究中非常重要，而目前的陈述不能使评阅者接受该一假设。

回应：我们在这个问题上的陈述不严谨。对此，我们做出了修改：“实验过程中确保被试不能看到自己的手，由于参与对手的运动视觉反馈的脑区都位于背侧通路，实验中看不到手的运动就实现不了对手运动的视觉反馈。此外，背侧通路既是视觉反馈的通路，也是触觉/本体感觉反馈的通路(Milner et al., 2012; Whitwell & Buckingham, 2013)。有研究认为，被试即使看不到视觉客体，只要有触觉反馈，也能够促进抓握行为(Bruno & Franz, 2009; Franz, Hesse, & Kollath, 2009)。但在本实验中并未给予被试包含位置信息的触觉反馈，在这过程中被试也不能根据触碰的位置调整判断，因为被试在完成“点”追随任务后也不知道是否准确。因此，是没有所谓的触觉反馈信息对任务判断造成的影响。所以，即使听障和听力正常人群的触觉反馈通路存在差异，但在本任务中，触觉并未对任务判断产生作用。所以，通过 open loop 实验的设计和装置使得被试在完成实验任务时既没有视觉反馈也没有触觉反馈(一定程度上限制了背侧通路的使用)，而完全依赖于本体的主观感觉。

为了更加清晰地说明 open loop 的实验过程，审稿人 1 意见中给出了实验装置图(左上图)。实验过程中，被试需将手臂至于镜子下方的箱子内，确保被试在实验过程中不能看到自己的手臂。实验过程中被试需要根据镜子中先后出现的“点”进行追随反应，即看到一个

“点”后就在箱子底部的白纸上，与镜子中出现的“点”的位置所对应的位置点一下（被试的食指绑有沾了墨水棉签）。在实验过程中在箱子左侧开口位置的外侧放有摄像头，以便记录整个“点”追踪反应的过程。因此，open loop 实验的完成过程既没有根据视觉反馈也没有根据触觉反馈的位置信息来调整判断，也就是在一定程度上限制了被试在完成与位置信息相关的任务过程中（点追踪反应）使用背侧通路，仅仅需要靠被试的自体主观平衡感来完成实验任务。

意见 2: 作者在修改说明中提出，“有研究认为，先天性的耳聋会引起前庭蜗神经的部分损伤，不仅包括耳蜗功能，还包括前庭传入。而前庭传入纤维的破坏是引起平衡缺陷的原因之一（Siegel et al., 1991），因为前庭信息对空间朝向非常重要（知觉我们的头和身体相对于外部世界的位置）。所以，听障人群的自体平衡感可能比正常人差（Angelaki et al., 2009）”。这些大多属于推测！希望能提供听障人群“对以自我参照框架下位置的感觉能力本身就存在缺陷”的直接证据吗？

回应: 我们对这一问题的论述不严谨。根据审稿专家的意见，我们作出了改正：有研究认为，先天性的耳聋会引起前庭蜗神经的部分损伤，不仅包括耳蜗功能，还包括前庭传入。而前庭传入纤维的破坏是引起平衡缺陷的原因之一（Angelaki et al., 2009; Siegel et al., 1991），前庭信息对空间朝向非常重要，即负责知觉我们的头和身体相对于外部世界的位置。由于空间参照框架的自我参照框架主要负责编码相对于观察者自己身体或身体某部位的物体的位置（Vogele & Fink, 2003）。此外，有研究表明听障人群背侧通路的视觉功能更易受影响而具有可塑性的变化（Bavelier et al., 2001; Bavelier & Neville, 2002; Lomber, Meredith, & Kral, 2010）。而以往神经心理学以及功能成像的研究结果表明，背侧视觉通路主要编码客体以自我为参照或以身体为中心的参照系的信息（Andersen & Buneo, 2002; Andersen, Snyder, Bradley, & Xing, 1997; Cohen & Andersen, 2002; Goodale & Milner, 1992）。综上所述，我们前期的研究假设是由于听障人群在知觉自身相对于外部世界位置的能力存在缺陷，会导致其在完成自我参照框架判断时的反应相对较慢，进而影响空间主导性和空间参照框架的交互作用。

意见 3: “伸够”（reach）的翻译不贴切。

回应: 改为“够取”（reach）。

第三轮

审稿人 1 意见: 谢谢关于 open-loop 范式的详细图解，修改稿方法和论述比较全面了。

审稿人 2 意见: 可以接受作者的修改和解释。建议在修改稿中尽量减少没有依据（或依据不足）的推测，在讨论和结论中尽量谨慎用词。

回应: 我们对此进行了适当调整。

编委复审意见: 作者对审稿人的意见做了详实回答，基本达到了学报发表的要求，建议小修后发表。

意见 1: 摘要最后一句话无主语。

回应: 已在文中摘要处补充。

意见 2:实验 1 实验流程不清楚,请作者进一步写清楚。如实验中每个试次的目标程序 150ms,但是随后作者又提到每个试次呈现时间为 1650ms。1650ms 是 150ms 刺激呈现时间+1500ms 反应窗? 实验共计多少次数,正式实验有多久,请作者写明。

回应:已在文中实验 1 方法部分补充。

意见 3:线图中 error bar 需要交代清楚性质(是标注误,标准差还是 95%CI)?

回应:已在文中线图部分对 error bar 进行了补充交代。

意见 4:论文中引用的参考文献在参考文献部分缺失(如(Zhang, Tan, Shen, Wang, Geng, & Chen, 2014)),请作者仔细核对。

回应:已在参考文献部分对缺失的参考文献进行了补充,并且仔细核对了所有参考文献。