# 蓝色为译者补充内容

绿色为生理解剖术语，需要检查是否一致。

**Regarding “Performance”**

1.as in ‘sports performance’: 即所谓的**表现**

2. as in ‘the performance of motor skills’，’skilled performance’. 对应动词perform，翻译成**执行、完成**

**Regarding ‘motor skills = actions’，movements**

1. motor skills 翻译成 运动技术，而不是运动技能，用于区分 skills 和 ability

2. actions 等同于motor skills, 即运动技术，可简约翻译成运动

3. movements, 翻译成 动作

## 第6章: 运动控制中的感官组成

**概念：**触觉、本体感觉以及视觉是运动控制中重要的感官组成。

**完成本章学习后，你将能够：**

* 描述存在于皮肤中为中枢神经系统提供触感觉信息的感觉接收器
* 讨论几种受触感觉反馈影响的动作相关的特征
* 描述为中枢神经系统提供本体感觉信息的多种感觉接收器
* 描述研究人员探究运动控制中的本体感觉作用所采用的的几种流程
* 讨论几种受本体感觉反馈影响的动作相关的特征
* 描述眼睛以及视觉的神经通路的关键解剖学组成
* 描述研究人员探究运动控制中的视觉作用所采用的几种流程
* 讨论如下与运动控制相关的话题：单眼视觉和双眼视觉、中央于周边视觉、视觉运动中的感觉-运动耦合、基于视觉的动作纠正，以及视觉变量tau

### 应用背景

当您拿起一杯水要喝时，触觉（即触摸）、本体感觉和视觉的感觉系统在你执行该运动时发挥着作用。 视觉帮助您定位到玻璃杯的位置并用你的手和手指抓住它。 触觉和本体感觉帮助你抬起玻璃杯，将其移向你的嘴边，并且保证玻璃杯不会从你手中滑出。如果没有这些关键的感觉系统为你提供的感觉信息，你将会面临相当大的困难来完成相对非常简单的任务，例如从杯中喝水。你之所以能够完成其他的日常任务，例如把钥匙插入钥匙孔、在过道的人群中穿行、以及自如的驾驶着你的车，都是因为有触觉、本体感觉以及视觉在为你的运动控制系统提供信息。类似的，体育运动同样需要也受益于上述相同的感觉系统所扮演的角色。例如，为了能够用手接球，你必须要能够看到球在哪，判断球到手的时间，把手位置摆好，然后当球到达手心时合上手指握住它。

针对以上所有的动作执行场景，从业人员将会受益于对触觉、本体觉以及视觉感觉系统的理解，包括了解他们的解剖学及生理学基础，它们如何影响的动作的控制，以及他们对人类运动技术的执行产生了哪些限制。在接下来的讨论中，我们将针对上述三种感觉系统分别介绍他们的解剖学和生理学基础，以及他们和协调性动作控制的关系。本章的目的是帮助从业人员建立理论基础，从而指导他们为其所服务的人群构建有效的技能学习和康复策略。

**待解决的应用问题** 当你伸手去取装了水的玻璃杯时，你是如何知道手需要伸出多远，需要用多大的力去抓握杯子，以及在把杯子拿到嘴边喝的过程中如何阻止杯子从手中滑落？当你在校园里行走，过马路时你是如何做到不被马路沿儿绊倒，或者又是如果避免不与对面走过来的人相撞的呢？

### 讨论

运动控制相关理论的核心特征就是感觉信息在控制动作执行过程中所起到的作用。在我们众多感觉中，触觉、本体觉以及视觉在运动控制中起到至关重要的作用。在人体感觉生理学中，触觉和本体感觉属于体感系统，而视觉是与视感觉系统相关的感觉。接下来的篇幅中，我们将针对性的介绍上述三种感觉，包括他们的神经学基础以及其在人体动作控制中的作用。

在开始讨论上述感觉系统之前，需要指出本章具有一定局限性，读者不要误认为运动控制中只涉及到这三类感觉。从文献(例如，Huber, Stathopoulos, & Sussman, 2004))中可以得知听觉信息对语言产生尤其重要；而从一些娴熟的运动员的传闻中讲到听觉信息对他们行为的重要影响作用，例如听觉信息能帮助他们判断棒球中被击中的球以及网球中发球中或接底线球中球的飞行轨迹特征。此外，已有研究(例如，Guerraz & Day, 2005)表明内耳中的前庭系统在身体平衡的控制以及躯干辅助的伸展接触动作中可能存在的手臂-躯干协调 (Mars, Archambault, & Feldman, 2003) 的控制中，起到重要的作用，尽管上述两类控制中均有触觉、本体觉以及视觉系统的参与。前庭系统也被发现似乎也在表征外界空间中起到一定作用(Borel et al., 2014)。然而，本章的目的是向读者介绍运动控制中感觉系统的参与情况，我们讨论的内容将限定于触觉、本体觉及视觉。

**触觉与运动控制**

考虑我们执行运动技术时的包含触觉的各种情况。一些运动技术需要我们操纵某个物体（例如，手持叉子，键盘输入短信信息，以及捡球）或操控人（例如摔跤，拳击和跆拳道）并且需要与我们环境中的自然特征互动，例如赤脚走在沙滩上，这些运动技术包含了利用属于体感系统的存在于皮肤中的触觉感受器，发觉到物体、人以及环境中的特征。

但是这些感官信息是如何被用于帮助我们执行这些技能的？ 为了回答这个问题，我们首先会考虑发觉这类感官信息的神经基础，然后描述研究所发现的那些受触觉信息影响的运动技能表现特征。

**触觉的神经基础**

当我们触摸到某些物品，皮肤中的*机械感受器*将会被激活为中央神经系统(CNS)提供有关痛觉、温度和动作相关的信息。这些感受器，如图6.1所示，紧邻皮肤表层位于真皮层。作为机械感受器，这些感受器用于发觉皮肤的拉伸以及关节的运动。这类感受器在手指指尖处是最密集的。

Diagram

Description automatically generated

图6.1触觉涉及皮肤感受器。(注意该图形不是按比例绘制的; 例如，帕西尼小体实际上比迈斯纳小体大4到5倍。) *来源:* Widmaier, E. P., Raff, H., & Strang, K.T. (2019). *Vander’s human physiology: The mechanisms of body function* (15th ed.). new york, ny: mcGraw‐Hill.

**触觉信息在运动控制中的作用**

研究人员普遍认同触觉在多种运动技术的执行和运动控制的过程中起到重要的作用。我们将简要的分析如下五大类受到CNS接收的触觉信息所影响的动作相关特征。首先，一个重要的特征即*动作准确性*：当无法获得触觉信息，尤其是指尖处的触觉信息时，动作准确性会下降。研究表明当去掉或最小化触觉反馈时，以下的一些运动技术准确性会变差：指向动作(Rao &Gordon, 2001), 伸手抓取 (Gentilucci,Toni, Daprati, & Gangitano, 1997), 键盘上打字 (Gordon & Soechting, 1995; Rabin &

Gordon, 2004), 实现精准的抓握(Fisher,

Galea, Brown, & Lemon, 2002), 根据声音刺激完成节律性的手指敲击 (Pollok, Müller, Ascherleben, Schnitzler, & Prinz, 2004), 以及在钢琴上弹奏一系列音符(Goebl & Palmer, 2008)。上述多数的研究中，研究人员麻醉了手指，所以中枢神经将无法获得由触觉传入的信息，这种方法提供了一种方法可以与未麻醉的情况下进行动作准确度的对比。另一种决定触觉传入信息的作用的方式是在活动的执行中加入触觉。例如，在Rao和Gordon(2001)的实验中，当参与者在执行指向动作时如果能够触碰到目标物，则他们指向的准确性相对于不触碰的情况更高。

触觉反馈影响的另一个动作特性是*动作一致性*。Gordon和其同事 (例如, Gordon & Soechting, 1995; Rabin & Gordon, 2004)的实验通过对比麻醉手指前后的打字表现，展示了键盘打字中触觉的作用。他们发现，没有了手指的触觉反馈，不仅仅是如上所述的打字准确度会下降，不同次尝试打字之间的一致性也减低了。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| A close-up of a chocolate bar  Description automatically generated with medium confidence | **深度阅读** | |
| **没有触觉反馈的打字**  在一个旨在调查触觉反馈对运动控制的重要性的实验中，拉宾和戈登(2004)让12名熟练的打字员(每分钟都能输入超过50个单词)在个人电脑键盘上输入他们面前的句子列表。当他们打字时，他们可以看到电脑显示器，但看不到自己的手。他们被告知不要改正错误。打字员在将右手食指麻醉之前和麻醉期间输入句子。这些句子很短，除了一个字母(y, u, h, n, m)用右手食指打字(例如，we washed)，其余字母由左手打字组成。这些句子中还包括需要用正确的食指打出所有字母的单词(例如yummy)。  **麻醉**: 将2%长效利多卡因和2%短效马卡因的混合物注射在右食指远端指间关节两侧正中神经附近。  **结果:**  **打字准确性**:在没有对右食指进行麻醉的情况下，打字者右食指打字出错率为3.5%。但是，当右手指被麻醉时，这个比例增加到16.5%。几乎所有这些错误(90%)都是瞄准错误，也就是缺少关键。右手其他手指在麻醉后没有出现错误的增加。  **手指运动学**: 在麻醉情况下，从前键到目标键的手指轨迹与麻醉前相似，尽管在麻醉情况下有更大的试验变异性。 | | |

第三点，触觉反馈也会影响*动作的计时性*，尤其是节律性的且间断与环境有接触的动作，例如抛接动作和移动(Ankarali, Sen, De, Okamura, & Cowan, 2014)。举例说明，Zelaznik及其同事们的实验表明，在限时的连续画圆的任务中加入一种触觉相关事件(比如，在圆圈的顶端贴上尼龙魔术贴)作为计时的提示，可以提高计时的准确性。

第四点，握持和使用物品时*动作力度的调整*也依赖着触觉的反馈。例如，当你从桌子上抓起一个杯子送到嘴边喝水时，在移动杯子及合理摆放杯子位置喝水的过程中，你需要调节抓握的力度。其他一些研究(例如, Gysin, Kaminski, &

Gordon, 2003; Nowak & Hermsdorfer, 2003; White, 2015)也报道了证据证明触觉反馈在抓握力的调整上所起的作用。这些研究表明了抓握的手指间断得更新CNS(见第五章中图5.3所展示的闭环控制系统)中动作的指令从而在必要的时候调整抓握力度。

最后，Rao 及Gordon (2001)得出如下结论：在指向动作的开始结束时存在触碰时，触觉反馈可用于增强本体感反馈的作用，用来*预估运动的距离*。

**本体感觉和运动控制**

本体感觉指的是我们对四肢、躯干以及头部位置和移动的感觉和知觉[[1]](#footnote-1)。尽管经常不被认为是我们的基本感觉，本体感觉是传到中枢的关于动作特征的信息，比如运动方向、肢体在空间的位置以及肌肉的激活等。闭环运动控制系统中，本体感觉起到至关重要的作用，而开环运动控制，中枢系统就不需要本体感觉便可以不需要本体感觉的反馈也可以下指令控制动作。有关我们是否可以不需要本体感觉去控制动作，以及本体感觉反馈在控制协调性动作过程中起到什么作用的各种问题，许多年来一直让动作领域科学家非常感兴趣(简短的历史性回顾请参考文献Willingham, 1998, 第574页)。

学者们采用了各种各样的实验方法来确定本体感觉在控制协调性动作中起到的作用。我们将讨论其中一些例子来向读者介绍目前针对这个问题的看法。然而，在考虑本体感觉在运动控制中作用钱，我们将简要的介绍一些本体感觉的神经学基础。

**本体感觉的神经学基础**

中枢神经系统利用传入神经通路接收本体感觉相关信息，这种通路起始于本体感受器，即一种位于肌肉、肌腱、韧带以及关节处的感觉神经元。这些神经元可以获取有关肢体位置及位置变化的信息。本体感受器有几种不同的种类，每一种会识别特定的肢体位置及动作的特征。我们这里我们侧重于检测肌肉长度变化的肌梭，检测肌肉张力变化的高尔基-肌腱器官以及检测关节运动变化的关节受体。

***肌梭*** 被称作肌梭的本体感觉接收器位于大部分骨骼肌的纤维内。控制眼睛，手和脖子的肌肉里具有最多数量的肌梭，因此它们可以非常精确地控制这些身体部位；例如脖子可以精准得协调控制眼睛、头部和其他身体部位。

如图6.2所示，肌梭是一种特定的肌肉纤维，包含一个既具有感觉受体又具有肌纤维的囊，称为梭内纤维(intrafusal muscle fiber)。肌梭与梭外纤维(intrafusal muscle fiber) 平行排列并直接附在肌鞘上。Ia型轴突能够非常迅速地传导神经冲动，是肌梭中的主要感觉受体。这些轴突包裹在梭内纤维的中间区域，并检测*肌肉长度和收缩速度的变化*。作为机械感受器，肌梭的感觉感受器会响应肌肉长度的变化，从而引起感受器的机械变形并产生神经冲动。而肌梭内部是拉伸感受器，它可以检测到拉伸量以及拉伸速度。 肌肉伸展时，来自肌梭的神经冲动频率增加； 当肌肉缩短时，频率降低。根据Macefield（2005）的观点，肌梭的这种肌肉长度检测功能使他们能够检测关节角度在某一个轴向的变化，这为分布在控制该关节肌肉里的肌梭提供了反馈的基础，反馈信息与肌肉长度变化的复杂模式相关。



图6.2肌梭和高尔基肌腱器官。(注意该图形不是按比例绘制的;为了举例说明，肌肉梭形与肌外肌纤维相比在尺寸上被夸大了。）来源*:* Widmaier, E. P., Raff, H., & Strang, K. T. (2019). *Vander’s human physiology: The mechanisms of body function* (15th ed.). new york, ny: mcGraw‐Hill. Adapted from Elias, H., Pauly, J. E., & Burns, E. R. (1978). *Histology and human microanatomy* (4th ed.). new york, ny: Wiley.

来自肌梭的神经冲动沿着传入神经纤维传播到脊髓的背根。 在脊髓中，这些传入神经纤维分成多个分支，进而根据动作情况完成如下几种功能。如果该运动是简单的反射运动，例如膝跳反应，则该冲动会沿着与脊髓腹角中的α运动神经元形成突触的一个分支进行传导，从而激活作用肌产生反射运动（膝跳反应的简化图参见图6.3）。 另一个分支与抑制性中间神经元形成突触，抑制性中间神经元会抑制拮抗肌的活性。 第三分支与运动神经元形成突触，而运动神经元会激活与预期运动相关的协同肌。 第四分支沿脊髓向上延伸至脑干，与中间神经元形成突触进而与负责运动控制的大脑区域建立联系。

在自主运动的控制中，肌梭的功能是作为一种反馈机制。 多年以来，研究人员认为肌梭在提供有关肢体位置和运动的反馈方面仅仅起到很小的作用。 但是，自1970年代初以来，随着研究的深入，这种观点发生了巨大变化，因为涉及肌肉振动和疲劳的实验证明，肌梭是本体感受信息的*最重要的来源*，其向CNS提供有关*肢体运动的位置，方向和速度特征以及努力感的信息*（对这段历史的简要回顾请参考Collins, Refshauge, Todd, & Gandevia, 2005; Proske, 2015; Proske & Gandevia, 2009）*。*CNS使用肢体运动反馈来控制必须停止在空间中特定位置的非连续性运动，以及控制正在进行的运动，以确保运动的空间和时间准确性。此外，一些研究人员（例如Albert等，2005）认为，来自肌梭的反馈也有助于CNS进行运动计划。

***高尔基-肌腱器官(Golgi-tendon organs，GTOs).*** 如图6.2所示，高尔基腱器官（GTOs）位于肌腱插入肌肉部位附近的骨骼肌中。 GTO由可检测*肌肉张力或力量变化*的Ib型感觉轴突组成； 该类轴突不能很好地检测出肌肉长度的变化。 这些感觉受体会响应由其附着的收缩肌所产生的任何张力。 GTO的轴突进入脊髓的背角，并与腹角处的中间神经元形成突触，而这些中间神经元会与α运动神经元形成突触，后者或是可以抑制收缩肌和相关协同肌，或是能够刺激拮抗肌的运动神经元。

**本体感受** 对肢体、身体和头部运动特征的感知，以及与肌肉收缩相关的力量和努力；传入神经通路向中枢神经系统发送关于诸如肢体运动方向、空间位置、速度和肌肉力量等特征的本体感受信息。

**本体感受器** 位于肌肉、肌腱、韧带和关节中的感觉神经元。这些神经元获取关于身体和肢体位置以及位置变化的信息。

肌梭: 一种本体感受器，由位于大多数骨骼肌纤维内的特殊肌纤维组成；他们检测**肌肉**长度的变化。

**高尔基腱器官**(GTOs): 一种位于骨骼肌中靠近肌腱插入肌肉的前感受器；他们检测肌肉张力或力量的变化。

***关节受体*** 有多种本体感受器是存在于关节囊和韧带中；它们一起被称作**关节受体**。这类受体明确的身份是神经科学家们争论的一个话题（例如， Collins,

Ref shauge, Todd, & Gandevia, 2005).）。不过，有一些是大家一致认为属于本类受体：Ruffini endings, Pacinian corpuscles, and Golgi-like receptors (Macefield, 2005). 并不是所有的关节都具备相同的受体类型。因此，科研人员把“关节受体”指代关节内的一个受体集合而不是某一个特定的独立的受体。作为机械感受器，关节受体会对关节运动角度，尤其当关节旋转或关节位置达到极限值的时候，产生响应。

Diagram

Description automatically generated

图6.3(新添加，未翻译)—膝跳反应简单图示

**探究本体感觉在运动控制中的作用**

本体感觉是一种很重要的反馈信息来源。当在闭环控制系统下执行某一个操作时，本体感觉信息让我们能够在运动的过程中修正动作。而在开环控制系统下，例如在快速的、弹道式的动作，即使存在着本体感觉反馈，由于时间的限制，我们并不能进行动作修正。

研究人员采用了多种技术来探究本体感觉在运动控制中的作用。在本小节的讨论中我们将考虑三种技术。其中两种技术包含了某种程度上的神经阻滞(deafferentation)后进行动作观察。意味着没有了传向中枢神经系统的本体感觉传入通路。第三种技术则是对参与控制动作的肌肉的肌腱进行震动处理，这样正常从肌肉和肌腱的本体感受器获得的本体感觉反馈就会受到扰乱。

**传入神经阻滞(Deafferentation)技术**

***手术法传入神经阻滞*** 用来探究本体感觉在运动控制中作用的其中一种方法，即在手术法进行传入神经阻滞后观察动物或者人的动作，这种方式意味着与感兴趣的动作相关的传入神经通路通过手术被抑制或去除了。有一些已发表的研究是在猴子身上进行了手术法传入神经阻滞。例如，两个最为著名的利用动物开展的系列实验是分别发表于20世纪六十年代和二十世纪七十年代，作者分别为Taub 和Berman (1963,1968) ，以及Bizzi 与其同事们 (如 Bizzi &Polit, 1979; Polit & Bizzi, 1978)。这些研究通过观察进行手术法传入神经阻滞前后猴子们执行一些经典活动，如梳毛和攀爬，亦或者一些新学到的动作，比如在看不到手臂和手的情况下指向灯光。实验的结果表明，尽管传入神经阻滞的猴子们依旧可以完成动作，但是动作精准度很明显得低于本体感觉存在的情况。

**关节感受器** 位于关节囊和韧带中的各种类型的本体感受器的集合；他们在极限运动和极限位置检测关节运动的变化。

**传入神经阻滞** 研究人员用来使本体感觉反馈不可用的过程(通过外科手术切断或去除传入神经)

运动中涉及的神经通路)；它也可能由损伤、手术或疾病引起，涉及本体感受的传入神经通路。

Chart, bar chart

Description automatically generated

图6.4 Blouin等人的实验结果显示了正常和传入神经阻滞的受试者在视觉环境可用(有结构)或不可用(无结构)，以及运动臂视觉可用或不可用的情况下再现手臂位置时的误差量。来源: 数据来自Blouin, J. et al. (1993). Reference systems for coding spatial information in normal subjects and a deafferented patient. Experimental Brain Research, 93, 324–331, New York, NY: Springer-Verlag.

通过手术法对人类受试进行传入神经阻滞显而易见是不可能的。不过，一些人由于特定的创伤或疾病相关的因素而被手术法进行传入神经阻滞显。例如，一些做了手指*关节替换*手术的类风湿性关节炎患者就不再拥有关节受体。最常被引用的利用这种方式研究本体感觉的研究是多年前Kelso, Holt 和 Flatt (1980)开展的一个实验。每次试验，受试会将他们的手机移动到标准化的一个位置，或者移动一个标准化的距离，然后手指返回到新起始位置，然后尝试再次移动到标准化位置或者移动标准化的距离。结果表明这些病人可以很轻松且准确得从新的起始点移动到标准化的位置。然而，他们从新的起始位置重现标准化运动距离时却有些困难。

**感觉神经病变导致的传入神经阻滞** 对于上臂或下肢感觉神经病变(又被称作周围神经病变)的人来讲，观察他们的运动特征为我们提供了一种非手术手段进行传入神经阻滞的人体探究。这些受试的多个身体部位的周围传入神经无法正常运转。一些情况下，他们的传入运动神经通路是完好无损的。

为了展示这种传入神经阻滞的方法是如何帮助我们确定本体感觉在运动控制汇总的作用，我们将讨论几个实验例子，这些实验让有感觉神经病变和无感觉神经病变的受试完成各种不同的任务。其中一个早期的报道了采用这种研究策略的实验是由Blouin 等(1993)完成的。他们对比了一个有感觉神经病变的患者和健康受试在使用上肢移动指针进行指点(pointing)任务。一些试验中，受试可以看到任务环境，而另一些试验中他们需要在没有视觉信息的情况下完成任务。图6.4所展示的结果是有视觉信息的情况，患者与健康受试的动作准确性相当。然后，当受试运动时看不到环境或手臂，患者总是会指的不准。因此，没有视觉反馈的情况下，传入神经阻滞的患者无法再次准确移动到特定的空间位置。

较新的一些研究也肯定了Blouin等 (1993) 的结果并进行了一定延伸。例如，在其中一个研究 (Messier, Adamovich, Berkinblit, Tunik, & Poizner, 2003)中，一个感觉neuropathy患者(标记为C.F.)和另外五名感觉神经健康的成人受试在看不见的情况下被要求记住面前的目标，并用平滑连续的动作完成伸手够达的任务。C.F.表现出较大的肢体运动空间误差，并且在低速、自我倾向的速度以及高度下，均无法在肩关节和肘关节处形成平滑和同步的动作。

第三个实验例子包括了一个更复杂的任务（Spencer, Ivry, Cattaert, & Semjen, 2005）。两个感觉神经病变患者以及三名对照组受试同时用双手画圆圈，每一轮用不同的速度画共15秒，在三种不同的视觉情况下完成该任务：全部视觉信息、部分手部视觉信息以及无手部视觉信息。两组受试明显的差别在于患者双手绘制出来的两个圆圈的大小(即宽度)和形状相对于健康受试的相似性更小。患者在每一轮画圈时其圆圈的位置每重复一次便会有所平移。值得注意的是，两组受试在双手协调的时间上(即每一个圈所需的时间)以及协调的相对相位上并没有差别。

**肌腱震动技术**

另一种途径不是去除而是扰乱本体感觉后再观察动作，这种扰乱采用的是高速震动与相关动作的动作肌相连的肌腱。这种震动扰乱了肌梭激活的模式，进而扰乱本体感觉反馈。Verschueren发表了几个实验为我们提供了利用这种技术的例子。例如，其中一个实验(Verschueren, Swinnen, Cordo, & Dounskaia, 1999a)中受试者蒙着眼睛同时用双手画圈，而震动应用在其惯用手臂的二头肌和三角肌前束的肌腱上。结果(见图6.5)表明震动影响了被震动的手臂所画圆圈的空间特征，而未被震动的，非惯用手臂所画的圈未受影响。此外，对惯用手臂的震动也影响到画圈过程中两个手臂之间的相对相位关系。

**运动控制中本体感觉的作用**

上述讨论的研究举例中可以看出我们*可以*再没有本体感觉反馈的情况下执行特定的肢体动作。最需要注意的一点是，Spencer等 (2005)利用感觉神经病变的患者所进行的试验中表明，代表着两侧协调动作特征的*双测肢体的同步性*并没有受到缺失本体感觉的影响。然而， 缺失本体感觉后还是会看到该种能力上的多种局限性。这些局限性使得我们可以确定本体感觉反馈在人体运动控制中的多种作用。我们将讨论三种特别显著的作用。

**动作准确性** 之前刚刚讨论过的实验结果表明本体感觉会影响到动作的准确性。在Taub 和Berman的研究中，猴子们相对于传入神经被阻滞前，在攀爬、抓握以及梳毛的过程中都显得更为笨拙。事实上，他们在传入神经阻滞的情况下抓握物品会存在困难。在Bizzi的实验中，研究人员发现当动物的姿态被改变后，传入神经阻滞的情况下它们的指点(pointing)准确性会下降。Kelso,Holt以及Flatt的实验表明人类受试在进行了关节囊替换后只能维持位置准确性；而距离移动被严重的打乱了。而感觉神经病变的患者所参与的实验也一致显示本体感觉缺失会导致较大的空间误差。此外，Spencer及其同事的实验通过增加了重复性两侧协调性动作，为本体感觉缺失导致动作准确性下降这一问题拓展了证据。

本体感觉对动作准确性的影响看起来主要是因为本体感受器为CNS提供的特定的运动学和动力学的反馈信息。当运动发生时间充足，允许动作修正发生时，人体就会提供有关肢体位移的反馈，这些反馈为进行空间位置修正提供基础，即通过向CNS连续更新肢体的位置信息而CNS会根据这些信息来调整肢体位置，进而实现肢体的空间准确性。此外，本体感受器会提供有关肢体运动速度和力度的反馈，这些信息会影响动作距离的准确性。

**动作指令的开始** 本体感觉反馈也会影响到*动作指令开始*的时机判断。Bard及其同事(1992)的一个实验为我们提供了好例子来证明本体感觉的这一作用。他们对比分析了健康的受试与一名因神经病变而导致了传入神经阻滞的患者的动作表现。受试者们被要求同时伸出食指并抬起同侧的脚后跟。他们根据声音信号开始上述动作，无论是健康的受试还是传入神经阻滞的受试均是类似得先启动了手指伸出的这个动作。假如传送给各个效应器的是统一的中枢运动指令，那么这种结果是在预料之中的。因为通向手指和脚后跟的传出神经通路距离是不同的，所以手指的动作会先开始。反过来，如果要求受试按照自己的节奏完成这个任务，则健康的受试会先抬起脚后跟；这暗示他们是根据脚后跟的本体感觉反馈来起始手指的动作的。相反的，传入神经阻滞的患者的表现和之前根据声音起始的场景中一致，意味着他们使用的是中枢运动指令作为脚后跟及手指动作起始的基准，而不是本体感觉反馈。

**协调性控制** 最后，本体感觉在*肢体协调*的各个方面也起到重要的作用。我们将通过两种受本体感觉影响的协调特征来展示这种作用。

第一，姿态的控制需要本体感觉。尽管相当多的研究证据表明姿态控制是许多相关参数共同影响的结果，比如视觉、肌肉骨骼系统、前庭系统、小脑和基底核的活动、认知过程、触觉感觉系统以及本体感觉，任何环节出了问题都可能会导致姿态失衡。Jeka及其同事们 (例如，Jeka, Ribiero, Oie, & Lackner, 1998)通过表明本体感觉和触觉共同为CNS传送关键信息使得人体在身体晃动时能够控制直立的站姿，进而向我们展示了本体感觉在姿态控制中的重要性。能证实本体感觉在姿态控制中作用的其他证据可从Barbieri等(2008)的实验中获得，该实验使用了肌腱震动技术。跟腱的震动后使得受试竖直站姿呈现出三度的向后倾斜。

第二种协调性特征与四肢和四肢节段之间的时空耦合。之前讨论过的Messier等(2003)的实验中，感觉神经病变的患者在多关节协调动作中存在一定的困难，这类动作包括如伸手触碰面前目标物。而在四肢间动作协调中，之前所讨论的Verschueren等(1999a)的研究则显示出两侧协调任务中本体感觉反馈对于两个手臂的时空耦合具有重要作用。而在相同研究团队(Verschueren et al., 1999b)的另一个研究则展示出本体感觉也影响着同一只手臂上的两个节段之间的耦合，例如上臂和前臂。此外，Spencer等(2005)展示了类似于感觉神经病变患者的两侧协调问题，尤其是在空间协调的控制和重复性动作中动作之间一致性方面。

**视觉和运动控制**

我们自身经历以及研究证据都告诉我们再所有的感觉系统中，我们最倾向于使用并最信任的是视觉。例如，当你一开始学习打字或者弹钢琴的时候，你毫无疑问得会觉得如果看到手指击打每个键，你就无法正确得完成任务。舞蹈初学者以及中风患者在重新学习走路时都存在一个相似的问题。如果看不到自己的双脚，他们便会看起来仿佛无法完成相应的任务。

上述anecdotal的经验表明了我们在执行运动时会倾向首选视觉。实验的证据同样也支撑了这个现象。其中最好的一个例子即Lee和Aronson(1974)的经典实验，经常被称作“移动房间”实验。婴儿站立在一个墙体能够向前、向后移动的房间里。但是地板是固定的不能移动。在这个感觉冲突的情境下，婴儿的视觉表明他们在移动，但是本体感受器却暗示他们没有移动。研究人员观察着墙体移动时婴儿姿态的反应。当墙体移动时，儿童们会进行姿态矫正及调整来维持站立的平衡，仿佛地板真的在运动。但是地板并没有移动，因此本体感受器并没有感受到身体在失去平衡。只有视觉系统能监测到任何不平衡的信息。值得注意的是，类似于“移动房间”对姿态控制的效应在更近期的一些研究中(请参见 Barela, Barela, Rinaldi, & de Toledo, 2009; Chung & Stoffregen, 2011; Stoffregen, Hove, Schmit, & Bardy, 2006)也有报告。

移动房间的实验像我们展示了我们在日常活动中会特别得优选视觉。这上述这些实验中，当本体感觉和视觉向中枢神经系统传送了相矛盾的信息，人们会注意视觉而忽略本体感觉。导致他们会进行毫无必要的姿态调整。

接下来我们将从多个角度讨论视觉在运动控制中的作用。首先，我们将考虑与运动控制相关的视觉神经生理学。然后我们将讨论目前研究人员探究视觉在运动控制中作用，所采用的一些方法。最后，我们将探究几个运动控制的相关话题，从而能让我们大致了解视觉在协调性动作控制中所起到的众多作用。

需要注意的是我们的讨论不会延伸到视觉系统解剖生理的细节描述，只是概要得介绍以期提供一个基础大致的理解。同样需要指出的是我们还会在本书其他很多的章节中提到运动技能控制中视觉的作用。例如，第7章会讨论视觉在特定技能的控制中的作用；第8章会讨论其在动作准备中的作用；以及在第9章，视觉在注意力的讨论中也是重要的一个方面，涉及到环境中场景信息的筛选，这对于动作目标的实现是必须的。此外，第12章讨论了视觉与学习阶段的关系，以及第14章讨论了示范中视觉的作用。

**视觉的神经生理学**

（解剖生理相关，未翻译）

**探究运动控制中视觉的作用**

研究人员采用多种多样的技术探究运动空中是觉得作用。最直接的技术是在人执行运动时记录他们的眼动数据。其他的一些技术提供了间接方式来确定人是如何在执行运动时使用视觉信息的。在接下来的小节中我们将简要的讨论这些技术。

**记录眼动数据**

眼动数据的记录需要使用特定的仪器来追踪眼睛的运动并记录下特定的时刻眼睛“看在”哪里。研究人员可以采集记录到受试*foveal vision*在特定时间间隔中的位移，以及在追踪过程中受试的视觉注视的位置和注视的时长。其中一种方式是让受试观看一个模拟运动表现场景的影片作为刺激，然后做出一定的反应。然后眼睛的运动将在影片中绘制出来，进而确定受试眼动的空间位置(即位移)，以及与动作相关的眼睛注视的特征。一个更复杂的方式是在受试真正执行动作时采集记录眼动数据。(有关眼动记录相关的详细讨论请参见Reimer & Sodhi, 2006。)

由Williams, Ward, Knowles和Smeeton (2002)所做的一项实验为我们提供了一个很好的例子，表明如何利用记录眼动数据来探究运动执行中对视觉的使用。该实验对比分析技术娴熟的相对经验较少的网球运动员是如何观察和反应网球比赛中可能会出现的一系列动作序列。这些运动员会观看近似真实尺寸的对手的影像来模拟比赛过程。其中一种影像是网球对手位于网对面的中场。然后展示该对手在比赛过程中正手、反手击球至观察运动员的左半场、右半场、中前场及中后场。两名运动员各自戴着眼动仪，然后被要求尽可能得像在真实比赛中那样又快有准的做出反应。结果显示技术娴熟的跟经验较少的运动员对比，会花更多的时间观察对手的躯干-髋部以及头-肩部位，但是经验较少的运动员则是会更长时间得观看对手的球拍位置。

**时间遮挡程序**

这种程序用来阻止观察者看到动作序列中的下一个环节，主要通过结束观察者所观看的影像，或者通过激活观察者所佩戴的特制的护目镜来实现阻挡。该程序可以探究一个人在执行运动技能时利用视觉监测环境场景信息所需要的时间。这种方法在存在多种动作可选的运动表现场景下作用尤其突出，类似场景包括有壁球的接发球，打篮球时决定应该运球、过人还是直接投篮，或者在交通繁忙的道路上行走。

当使用影片或视频展示动作序列时，操作者会在预定时间点停止影像的播放，并要求观察者尽快做出响应。Abernethy和Russell（1987）的实验便是使用此程序的一个极佳的且常被引用的例子，在该实验中，羽毛球运动员观看了另一个运动员各种发球时的影片。 影片停止播放时，受试者需要标记出他们所预测的羽毛球落地位置。影片会停在不同的时间点，包括对方击球前、击球过程中以及击球后。通过记录受试者羽毛球落地预测正确率与其进行判断的时刻之间的关系，研究人员便可以决定出受试者在所观察动作序列的什么时刻视觉已经捕获了用于做判断的信息。



图6.8 用于研究视力在接球中的作用的PLATO(用于屈光不正的便携式液晶装置)视觉遮挡眼镜;这个人可以看到球，直到它接近他的手，然后他的视力被遮挡。镜片由特殊设计的液晶电池构成，每个镜片上都有一个电场提供能量。这种隐形眼镜几乎可以瞬间从透明变为半透明(约35微秒)，从而阻止佩戴者感知视觉信息，也可以从半透明变为透明(约1微秒) 来源*:* Courtesy of Dr. Paul Milgram, Translucent Technologies, Inc., Toronto, Canada (http: home.ca.inter.net/~milgram/plato.html); photograph by Avner Levona.

一些研究人员利用时间遮挡程序来确定动态的团体球类比赛如足球比赛中，经验丰富的运动员是什么时候利用视觉检测关键信息的。在这类比赛中，成功的表现往往是取决于对对手或者队员的行为的预判，例如他们是否会传球或者射门。为了获得球员监测这类关键信息的时刻，研究人员会给受试者展示一些录像片段，这些片段会停在特定动作前的多个时间点，然后让受试者指出录像中的球员将会有何种动作。这类研究的普遍的结论是上述关键信息一般是在临近特定动作(例如传球或射门)开始的最后几秒种时刻被监测到（参照North & Williams, 2008）。

另一种时间遮挡程序包括使用一种特殊设计的视觉遮挡眼镜，如图6.8所示。透镜包含液晶，实验者可以激活或去激活液晶以使眼镜透光或被遮挡。镜头状态的变化非常快(1-5毫秒)。这种镜片的一个好处是，它们几乎可以瞬间改变视觉条件，使得眼睛不需要像正常情况下花一定的时间来适应明暗条件的变化。视觉遮挡镜头比上述停止视频播放的方法要更有优势，因为这种眼镜能够允许研究人员让研究参与者在他们常规的环境背景下运动。这种技术的一个局限性是研究人员通常需要使用手动按钮来触发视觉遮挡。最近，随着激光幕帘的发展，这一限制得到了克服，当表演者的运动使激光变形时，激光幕帘会自动触发(Brenton, Müller, Rhodes, & Finch, 2018)。有了这种设置，研究人员现在可以在对手动作的特定时间点更精确地遮挡视线。

在实验室环境中使用时间遮挡技术产生的一个问题是：从该过程中获得的结果是否与人们在现实环境中执行相同动作时使用视觉的方式一致？Farrow, Abernethy 和 Jackson(2005) 用新手和熟练的网球运动员的实验解决了这个问题。结果表明，基于实验室环境的时间遮挡技术可延伸至真实世界的环境。

**事件闭塞程序**

这个程序也称为*空间遮挡程序*，包括编辑影片或视频以遮挡部分环境背景或运动者。*事件遮挡程序*用于识别人做出反应时所用的特定的视觉信息。影片或视频每一帧的部分内容会被屏蔽，这样观察者就看不到被屏蔽的那些动作。



图6.9 事件遮挡过程的例子:在阿伯内西和拉塞尔实验中，当被试观看羽毛球发球的电影时，发球动作的各个部分被遮挡，无法被看到。注意，在这些画面中，伺服器被遮挡的部分是(上一行从左到右):手臂和球拍，球拍，(下一行从左到右):腿，头，无事件控制画面。

图6.9给出了这个过程的一个例子，取自Abernethy和Russell(1987)研究的第二部分内容。在他们的实验中，当参与者看不到击球者的手臂和球拍、球拍、头部或腿部时，他们仍会预测出羽毛球的落点。这种方法的逻辑是，如果一个人在看不到对手动作中某些特定信息的情况下表现如果更差，那么该特定信息就包含了运动员用来确定击球的视觉信息。

**视觉在运动控制中的作用**

视觉在协调运动的控制中起着许多作用。在接下来的章节中，我们将结合研究人员调查的几个问题来讨论这些作用。我们将在第七章中进一步探讨视觉在运动控制中的作用，讨论它在控制特定运动技能中的作用，如抓握、移动、接住物体和击打物体。

**单目与双目视觉**

研究人员研究的关于视觉在运动控制中的作用的问题之一涉及到我们到底是使用*单目(即一只眼睛)视觉*来执行运动技能，*还是双眼(即两只眼睛)视觉*。研究证据(例如，Coull等，2000；Goodale & Servos，1996；Servos，2000；Zago, McIntyre, Senot & Lacquanti，2009) 已经表明，当从双眼接收视觉信息时，运动控制系统会更有效和高效地运行。虽然人们只用一只眼睛就可以够到和拿起物体，但是随着人与物体距离的增加，单眼运动效率便会降低。实验(如Coull等，2000；Grant，2015) 表明了距离的这种影响，支持了双目视觉对*深度感知* 至关重要这一观点。

|  |
| --- |
| **深度阅读** |
| **外围视觉在掷铁饼时提供了重要信息**  比利时的两位研究人员(Lenoir &amp;Mazyn, 2005)研究了10名经验丰富的铁饼投掷者，以确定在投掷过程中中央视觉和周边视觉的贡献。投掷者用全视觉、仅有周边视觉、仅有中央视觉和无视觉进行投掷。结果显示，在只有中央视觉和没有视觉下的投掷比有完整视觉和周边视觉的投掷要短得多。这些结果表明，在投掷过程中，周边视觉为投掷者保持对身体旋转的控制提供了必要的信息。 | |

单眼视觉似乎会干扰运动规划和运动执行。当在运动计划中只有一只眼睛可用时，人们总是低估了与物体的距离以及物体的大小。这些低估在运动过程中不会得到纠正，这也表明我们需要双目视觉为纠正肢体运动错误提供重要信息。对这些问题的研究表明，在运动过程中运动误差包括有运动学方面(如，Bingham, 2005; Jackson, Newport & Shaw, 2002)以及运动终点准确性方面(例如，Chapman, Scally, & Buckley, 2012; Heath, Neely, & Krigolson, 2008)。有趣的是，当人们不被允许使用双目视觉，必须用单目视觉伸手去抓住一个物体，他们会刻意移动他们的头从而使自己能够获得有关这个物体的大小和距离的更准确的信息(见 Marotta, Kruyer, & Goodale, 1998)。当我们能获得本体感受信息用于帮助定位空间中的目标时，单目视觉下伸手触达的动作能够得到改善。例如，当用另一只手握住针时，实验者穿针引线任务完成得要比针单独摆放着的情况下更快、更准确 (Tugac, Gonzalez, Noguchi, & Niechwiej-Szwedo, 2019)。

对于其他运动技能，如移动和拦截移动物体，双目视觉同样能比单目视觉提供更好的运动控制。例如，研究证据表明，当一个人沿着一条路行走并且必须跨过一个障碍物时，双目视觉对于检测环境的三维特征是非常重要的，而启动动作并跨越障碍物需要上述的三维特征信息 (Patla, Niechwiej, Racco& Goodale, 2002)。该信息使人能够在跨过障碍物时准确地移动步伐从而避开它。在这个例子里，我们再次看到证据证明了双目视觉对深度感知的重要性。

最后，双目视觉也提供了重要的信息来帮助我们拦截移动的物体。支持双目视觉这一作用的一项研究证据记录在如下实验中：参与者使用单目或双目视觉来撞击移动的物体(Scott van der Kamp, Savelsbergh, Oudejans & Davids, 2004)。结果显示，使用单目视觉的参与者会更频繁地错过物体，这表明双目视觉提供了重要的信息来指导拦截类动作，例如击打移动的球。

**中央和周边视觉**

另一个相关问题涉及*中央和周边视觉*在运动控制中的作用。**中央视觉**，有时被称为中央窝视觉，只能检测到视野中间2-5度内的信息。另一方面，**周边视觉**在上述界限之外的视野中检测信息。对大多数人来说，视野在水平方向覆盖约200度，在垂直方向覆盖约160度。目前的理解是，两种视觉都各有自己的贡献。为了演示中央和周边视觉如何为运动控制提供不同的信息，我们将考虑讨论针对如下两种与日常生活相关的运动技能的研究：伸手抓握物体，以及移动。

首先，想象你坐在一张桌子旁，打算拿起桌子上的一个杯子。在这种情况下，当你准备移动时，中央视觉会盯着杯子以获取它的大小、形状和与你当前位置的距离等信息。当你开始伸手去拿杯子时，周边视觉将获取你移动的手的信息，并提供实时反馈来指导你伸手去抓杯子。当你的手靠近杯子时，中央视觉再次变得重要，因为它要为你提供实际抓握住杯子所需的信息。

有大量的研究证据支持中央和周边视觉在伸手抓握任务情境中上述的那些作用。例如，Sivak和MacKenzie(1990)的一项实验表明，当参与者只能使用中央视觉来伸手抓物体时，只有组织、控制动作会受到影响，但抓握物体的动作并不受影响。当研究人员阻止参与者使用中央视觉，即他们只能使用周边视觉来伸手抓物体，移动手臂和抓握阶段都会出现问题。

Sivak和MacKenzie实验的结果与其他研究报道的结果是一致的，这些研究显示了中枢和周边视觉在控制肢体运动中各自发挥特定的作用，尤其是涉及手动瞄准和抓握的动作(有关这项研究的综述请参见Gaveau等，2014及Jeannerod & Marteniuk，z1992)。

中枢和周边视觉在移动中也扮演不同的角色。例如，研究表明，当我们沿着一条路行走时，中央视觉提供信息来引导我们保持在这条路上，而周围视觉则为我们提供并更新道路环境的空间特征，例如下坡或颠簸(Turano, Yu, Hao, & Hicks, 2005)。在运动过程中，通过周边视觉接收的信息对于帮助人们保持他们的行动目标而不受道路问题 (例如障碍物、其他路人或楼梯上不规则的台阶)的影响，是至关重要的。

**中央视觉** 视野中间2到5度的视野；它有时被称为中央窝视觉。

**周边视觉** 中央视野2到5度以外的视野。

**光流** 照射到眼睛视网膜上的光线的运动模式，这些光线是从环境中的物体和特征发出的，并且是特定于环境中的物体和特征的。

在一项结合了伸手抓握和移动的研究中，Graci (2011) 让参与者在他们行走路径终点处的桌子上拿起一满杯水，并将杯子移到桌子上的一个新位置。他们要么用全部视觉信息（包括下半身、桌子和玻璃杯）来执行这项任务，要么用被遮挡的视觉（在到达桌子时无法用周边视觉来看桌子和他们的下半身）来执行任务。两种情况他们都能看到那杯水。没有周边视觉的影响之一是接触玻璃杯的时间，即从他们最后一步结束时开始计算，直到他们的手接触到玻璃。没有周边视觉，接触玻璃的时间增加了大约40%。

周边视觉可用于控制动作的最重要信息来源之一是**光流**。光流是指从环境的各个部分照射到眼睛视网膜上的光线运动模式。“流”一词意义重大，因为它表明了视觉检测信息是动态的。当我们的头部在环境中移动时，无论是通过头部转动、姿势摇摆还是身体移动，我们的视觉系统都会检测并使用与头部运动的速度和方向精确协变的光流模式。类似地，物体、人或支撑面的移动为视觉系统提供了不同的光流模式，该光流模式指定了环境的移动特征，即移动方向和速度。区分不同的光流模式使我们能够有效地控制姿势、移动和进行物体操纵，使我们的行为与环境中的控制条件相协调。(有关光流研究的高水平综述以及使用光流的一项实验，可参加见Konczak,1994；关于光流响应发展的综述，参加Anderson, Campos, & Barbu-Roth，2004。)

**用于运动控制的两种视觉系统** 中枢和周边视觉的不同行为作用，以及神经生理学的支撑证据，使得一些研究人员提出视觉系统实际上是两个平行运行的解剖系统 (关于这两个视觉系统的更详细讨论请见Brown, Halpert, & Goodale, 2005)。例如，Paillard (1980)提出了一个*动态*视觉通道负责处理周边视觉中的视觉信息。该通道将处理高速运动信息并控制肢体运动方向。为了处理中央视觉中的视觉信息和慢速移动的信息，Paillard提出了一种*静态*视觉通道。其他研究人员提出了类似的双通道视觉系统，但给它们起了不同的名字[[2]](#footnote-2)。一些例子包括*焦点*视觉系统，它负责通过中心视觉检测静态物体，以及*周围环境*视觉系统，它检测物体和我们周围的运动，包含周边视觉 (Trevarthen，1968)；另一个是*视觉感知*系统，它将负责识别和描述一个人所看到的，以及*视觉行动*系统，它将负责利用感知来引导运动 (Brown, Halpert, & Goodale, 2005; Goodale & Milner，1992)。

如果用解剖学术语描述，由Goodale和Milner(1992)确定的两个视觉系统被称为*腹侧通路*，用于精细得分析视觉场景的形式、颜色和特征——换句话说就是一个人正看到了什么——以及*背侧通路*，其负责看到空间特征并指导动作(例如，Cameron, Franks, Enns, & Chua, 2007; Reed, Klatzky, & Halgren, 2005)。正如这两个系统的命名所暗示的，这两个系统的神经通路在解剖学上是不同的。用Goodale和Milner术语来描述这两个系统，视觉感知系统通过从初级视觉皮层到颞叶皮层通路来处理视觉信息，而视觉动作系统将信息从初级视觉皮层传递到后顶叶皮层**(**Brown，Halpert&Goodale，2005；Reed等，2005)。

上述两个系统的一个重要特征与我们对该系统探测到的信息的主观意识有关。我们通常是会有意识得意识到腹侧途径检测到的信息，但意识不到背侧途径检测到的信息。这种分离导致腹侧或背侧通路受损的患者出现一些有趣的行为。例如，腹侧通路受损的病人可能无法意识到某个物体的大小或方向，但仍能够毫无问题地拿起并操控它 (Goodale & Milner，1992)。

**感知-动作耦合: 视觉和运动的协调**

当你在电脑上玩游戏时，你必须快速而精确地移动鼠标或操纵杆，才能让你所控制的对象击中目标；或者是当你想快速开门锁时，你的眼睛和手必须协调工作，才能执行上述这些动作。同样，当你想踢中一个移动的球或用脚停住它时，你的眼睛和脚要协调一致才能成功按预期完成动作。在这些类型的运动情境中，视觉和手或脚的空间、时间协调便是所谓的感知-动作耦合的例子。这意味着对物体的视觉感知和实现动作目标所需的肢体运动是“耦合的”，或者说是协调的，从而使人们能够执行眼手和眼脚协调动作。感知-动作耦合不局限于手和脚或视觉系统，而是可以在动作 (如姿势或移动) 与环境特征相协调的任何情况下看到。

研究人员确定这种协调特征的方法之一是将我们在前面部分讨论的眼动分析技术与第2章讨论的运动分析技术结合在一起。尽管感知-动作耦合可以涉及任何动作(一个极好的例子便是在Lee & Aronson[1974]移动房间实验中描述的视觉-姿势耦合)，我们在这里将集中讨论视觉和手动作的耦合。

眼动分析中关注的特征之一是*注视点*，即在任何特定时刻中央(即中央窝)视觉所注视的环境中的某个特定位置。例如，为了评估视觉和手向目标运动的协调性，研究人员计算注视点终止的时间和/或位置与手部动作的时间和/或位置之间的关系。如果注视点和手部动作在时间或空间上是耦合的，则相对于手部动作的总运动时间和/或距离，注视点应出现在与手一致的时间和/或位置比例处。

Helsen, Elliott, Starkes和Ricker (1998) 的一项实验证明了视觉和手部动作之间的耦合。参与者将食指从他们前面的起始位置向右移动40厘米，以尽可能快的速度到达1cm✖️2cm大小的目标物体。注视点和手总是不能一次到达目标位置，需要进行一次或多次修正才会击中目标。分析表明，通常人在开始移动手*前*约70毫秒，眼睛就开始动了。最初的眼动将注视点移至非常靠近目标的位置(约为总距离的95%)，之后参与者进行第二次眼动，以校正第一次眼动的距离不足。注视点通常在手指*早*450毫秒到达目标，使得视觉反馈能够及时校正手的动作。研究人员发现了眼球运动和手部运动之间*时间耦合*的证据，因为眼球运动的启动时刻与手部运动加速度峰值出现的时刻重合。*空间耦合*也被如下结果证实：当手的移动距离为总移动距离的50%时，注视点始终停留在目标上。

上述实验之后，相同的研究人员(Helsen, Elliott, Starkes, & Ricker, 2000)发现，肘部和肩部运动的启动也与眼睛、手运动的启动存在耦合。启动的顺序是眼睛先动，然后是肩膀，然后是肘部，最后是手指。在每个参与者的每次测试中，注视点都在手到达目标之前很久就锁定在目标上了。视觉和脚在身体移动中也表现出类似的耦合效应。例如，研究人员表明，有视觉凝视缺陷的人在爬楼梯时会出现抬脚和迈步的问题((DiFabio, Zampieri & Tuite, 2008)。因此，这些实验和其他类似实验的结果支持了视觉对于获取关键空间信息以启动和引导肢体向目标运动、提供空间和时间反馈以确保肢体准确到达目标起到重要作用。

**基于视觉的运动矫正所需要的时间**

影响视觉在运动控制中作用的一个重要因素是在运动过程中使用视觉反馈调整动作的可用时间。回想我们在第5章中针对闭环控制系统的讨论，只有当人有足够长的时间来检测运动误差并修正动作时，反馈才能用于进行动作校正。这意味着运动者要想能够在完成运动之前使用视觉反馈来纠正运动错误，是有一个最小的总运动时间的要求的。

那么重要问题就是：在视觉反馈的基础上*进行运动校正所需的最小时间是多少？*从Woodworth1899年的研究开始，100多年来研究人员一直试图回答这个问题。研究针对这个问题的最积极的研究发生在二十世纪后半叶，从1968年Keele and Posner的一个有影响力的实验开始。不幸的是，所有这些研究工作并没有能给我们提供出一个精准的答案 (对这项研究的精彩综述详见 Carlton, 1992 and Elliott, Helsen, & Chua, 2001)。问题的一部分在于不同的实验过程给出视觉反馈处理时间的不同估计值。

|  |  |
| --- | --- |
|  | **深度阅读** |
| **“快速逼近”在电视和电影中的使用:一个我们使用Tau的例子**  有关人利用什么信息来判断迎面而来物体接触时间的相关问题，Abernethy and Burgess-Limerick (1992)在他们的综述里指出，如果一种基于tau的方法来获取接触时间是可行的，“观察者首先必须对光学扩张或‘快速逼急(looming)’所提供的信息相当敏感。”(p.366) 他们接着描述了支持这一预测的几项研究。虽然这些研究对搭建tau科学依据很重要，但我们大可从日常经历中找到证据证明我们对 “快速逼近”(looming) 是有敏感度的。  你是否曾经在看电视或电影时，体验到物体从屏幕中直接对着你飞出来的错觉?因为电视和电影是二维的，视觉特效的人员运用了“快速逼近”的概念创造出物体从远处移动的三维效果，表现得好像物体正从屏幕里飞向观众。这种错觉是通过让物体在屏幕上看起来很小，然后让它的尺寸进行非线性地膨胀(例如，开始缓慢，然后迅速)。膨胀率的变化会产生物体飞出屏幕并击中你的错觉。毫无疑问，你已经观察到了这个“快速逼近”的错觉，并且实际上你会通过移动你的头来避免被撞到。这种行为反应特别有趣的是，即使你知道物体不可能从屏幕上飞出来撞到你，你还是会避开。这里重要的一点是物体的距离和速度没有变化；只有大小在改变。正是这种基于尺寸的变化，以及它的非线性膨胀率，为tau提供了一种方法来计算迎面物体的接触时间。 | |

最常见的实验过程是让人们以不同的目标运动时间进行手动瞄准。在一些试验中，当人开始移动时，灯会熄灭，而在其他试验中，灯仍然亮着。这一过程的逻辑是：如果视觉反馈是必须的，瞄准精度将随着灯光熄灭而降低，因为人看不到目标而不能使用视觉反馈。当参与者不知道灯什么时候开或关时，处理视觉反馈的时间估计在190到260毫秒之间。然而，后来的实验使用了同样的灯光开-关程序，但是参与者对灯开关是知情的 (例如，Elliott & Allard, 1985; Zelaznik, Hawkins & Kisselburgh,1983)。有了这种前置信息，视觉反馈可以在不到100毫秒内使用。

其他实验使研究人员得出结论，视觉反馈的处理时间可能比开-关灯程序估计的时间更快或更慢。这些程序包括通过让人们戴棱镜眼镜来扭曲视觉信息(例如，Smith & Bowen, 1980，预估时间约为150毫秒)；在人向目标发起移动之后挪动目标位置(例如，Brenner&Smeets，1997，2009，估计的时间在110到150毫秒之间)；以及阻挡离目标部分距离的视觉反馈(例如，Spijkers & Lochner, 1994,估计时间约135毫秒)。

虽然不可能确定出利用视觉反馈来校正运动所需最小时间量的确切值，但是对于大多数运动技能来说，用100到160毫秒来估计运动校正的时间范围还是合理的。但需要注意的是，当运动者提前预知需要进行动作校正的情况下，该最短时间可能会缩短。

**应用于现实的运动表现** 校正动作所需的最短时间的这个问题与现实环境中运动技能的表现有关吗？当我们试图评估运动技能、日常生活活动相关的表现时，了解这一时间限制是非常有意义的。例如，一个人是否有时间调整他或她接球的初始动作取决于接球的可用时间。如果球的速度太快，或者球移动的距离太短，以至于不能进行任何动作调整，那么接球的成功将取决于手的初始位置。同样，如果一个人在爬楼梯时速度过快而无法调整脚的位置，摔倒的风险就会增加。

**接触时间(Time to Contact)：光学变量τ**

当一个人向一个物体移动并与之接触，或者物体向这个人移动时，例如接球或击球时，视觉在确定**何时**启动动作以及与物体接触方面起着重要的作用。在这些情况下，重要的视觉信息是*接触时间(time to contact)*，即物体从特定距离接触人(反之亦然)之前剩余的时间量 (见Bootsma & Peper，1992)。*接触时间是根据眼睛视网膜上物体图像大小的相对变化率来确定的*。当物体靠近人或人靠近物体时，物体以越来越快的扩展速率形成了越来越大的视网膜图像。当这个图像达到某个临界扩展速率时，它将会触发该情况所需的动作。

在20世纪70年代早期，David Lee (1974)证明接触时间由光学变量来确定，他称之为tau(τ)。他还表明，τ可以通过将物体大小、物体与人的距离以及该物体本身参照人形成的角度联系起来，进行数学公式量化。在数学术语中**，**τ是当物体靠近速度是定值的情况下，运动物体对应视角的相对变化率的倒数**。**自Lee的文章发表以来，许多运动控制和学习领域的研究人员研究了tau在控制我们的行动和运动中所起的作用(见 Lee，2009年和Lee等，2009, 对这项研究的总结)。

tau变量的运动控制的优势在于其预测功能，使得动作的启动和物体接触在特定时间“自动”发生，无论物体或人的速度如何。例如，驾驶汽车时，驾驶员为避免与另一辆汽车相撞而采取的制动动作的启动和制动量并不取决于驾驶员对与另一辆汽车的距离和速度的认知。相反，通过确定了任意距离和速度下的接触时间，是另一辆车的视网膜图像大小的变化率为驾驶员提供了信息来判断是否制动或减速。我们将在第7章考虑*tau*及其与特定运动技能的关系。

**本章小结**

* 触觉、本体感觉和视觉是运动控制中重要的反馈来源。
* 触觉提供对于运动控制很重要的触觉信息。皮肤中的机械感受器是通过检测皮肤拉伸和关节运动来提供这种信息的感觉感受器。研究表明，触觉反馈在运动控制中很重要，可以影响与运动相关的特征，如运动准确性、运动一致性、正在进行的运动的力量调整，以及帮助本体感觉估计运动距离。
* 本体感觉信息由位于肌肉、肌腱、韧带和关节囊中的感受器检测。肌梭是向中枢神经系统提供肢体位置、方向和速度反馈的最重要的感受器。高尔基腱器官检测肌肉力量的变化。当角度运动或关节位置处于极限时，关节接收器提供关于关节运动的反馈。
* 为了研究本体感觉在运动控制中的作用，研究人员使用了几种去除或变形本体感觉反馈的实验技术。这项研究的结果表明，本体感受反馈会影响多种运动控制功能，包括运动准确性、运动命令的开始时间以及身体和肢体部分协调的各个方面，如姿势控制、肢体和肢体部分之间的时空耦合，以及适应需要使用非首选协调模式的运动情况。
* 比起其他感官，我们更倾向于使用和相信视觉来控制运动。视觉作为感觉信息的主导来源，通常是在视觉和本体感觉提供的运动特征信息相互冲突的情况下被观察到的，这种现象在“移动房间实验”中得到了证明
* 视觉是由眼睛中的感觉感受器产生的，这些感受器通过角膜、瞳孔、晶状体和视网膜等结构接收光波，并将到达视网膜的信息通过视神经传递到大脑中的视觉皮层。
* 为了研究视觉在运动控制中的作用，研究人员使用了几种实验技术，如眼动技术和时间和事件(空间)信息的遮挡技术。
* 研究证据表明，视觉在运动控制中起着几个重要的作用，例如为与物体、他人和我们日常环境的互动中提供深度感知；提供信息让我们识别物体、人和其他环境背景成分；提供信息让我们能够在环境中穿行；协调眼手协调活动中的动作；并在我们移动时进行动作校正。
* 研究证据表明，视觉系统实际上是两个解剖和生理系统。视觉感知系统允许我们识别和描述我们所看到的东西；视觉行动系统允许我们在环境中移动。
* 在人向物体移动以与其接触的情况下，或者在物体向人移动的情况下，视觉变量 *τ*明确了接触时间量。在接触的关键时刻，运动控制系统启动当下情况所需的动作。

**从业人员（Practitioner）要点**

* 因为触觉、本体感觉和视觉对人们进行日常生活和娱乐活动很重要，所以这些感觉系统的缺陷如何解释一个人在进行特定活动时可能遇到的困难，是很重要的一件事。动作准确性和协调性问题可能是感官相关问题的结果。
* 当人们开始学习一项需要依靠触觉和/或本体感觉才能成功表演的技能时，他们通常会用视觉来代替触觉和/或本体感觉，例如在学习键盘或弹钢琴时看着手指敲击键盘键；在学习运球时看着手；在学习舞蹈动作时看着脚。
* 确保一个人的中心视觉(即凝视点)直接聚焦在需要抓住或抓住的物体上，以确保行动目标的成功实现。
* 只有当有足够长时间时，人们才能在执行动作时进行动作修正，因此，运动误差可能是由于运动或环境条件太快而无法校正的结果，即使该人知道他或她需要进行运动调整。例如，球的速度太快，以至于无法校正手或棒球棒或网球拍的位置来接住它；或者当一个人跨过障碍物时，或当他在楼梯上时，移动得太快，以至于无法校正脚的位置或动作误差。

1. 运动觉（Kinesthesis）是一个和本体感觉相关的术语。关于二者的差异性争论很多。有的时候二者会各自代表一些特定的感觉信息；但有时被当作同义词来用。本书中，本体感觉（proprioception）指代从本体感受器传到中枢神经系统的有关身体四肢位置和运动的感觉信息。 [↑](#footnote-ref-1)
2. 测试Paillard的两个视觉系统模型的研究综述，以及支持和延伸了该模型的两个实验，请参见Proteau、Bolvin、Linossier& Abahini (2000) 此外，关于该模型的辩护，Milner, Ganel, and Goodale (2012)。 [↑](#footnote-ref-2)