



偏振光视觉 ——昆虫的全球定位系统

贾雷坡

全球定位导航系统就是利用定位卫星,在全球范围内实时提供全天候、全球性的定位和导航服务。目前,在行业内最著名的就是美国的 GPS 系统。毫无疑问,昆虫是无法连接到人类 GPS 系统的,那么昆虫是如何找到回家之路的呢?

昆虫总有一些令人惊奇的本领,让自诩为“万物之灵”的人类望尘莫及。每年八月,成群的蜉蝣在多瑙河畔聚集,开始为期两天的交配和产卵活动。弥漫的飞虫数量众多,如同织就了一顶绿色的帷帐,遮盖了水面和路面,甚至是停靠在路边的车辆,远远观之,令人咋舌。而到了夏末秋初,昆虫界最壮观的长途迁徙开始上演,数千万只色彩绚丽的帝王蝶浩浩荡荡地从美国北部出发,飞行逾 4000 千米,穿过整个美国,最终抵达温暖的墨西哥中部,并在那里度过漫长的冬季。再看南半球,撒哈拉沙漠的正午时分,阳光猛烈,多数动物躲在阴凉处打盹,而箭蚁在远离巢穴数百米外的地方觅食。为了避免高温炙烤,它需要尽快回巢。浩瀚的沙漠变幻莫测,来时的足迹已经被沙砾淹没,但它依然能准确无误地沿着一条直线安全返回。同样在非洲,夜幕下的草原危机四伏,蜣螂借

着月光,用最短的路程将粪球推回自己的洞穴。

为什么蜉蝣会大量滞留在路面或车上?帝王蝶如何在漫长的旅程中保持航向?箭蚁和蜣螂又怎么在茫茫沙漠中找到回家的捷径?答案就是:这些昆虫装备了生物全球定位系统——偏振光视觉。

什么是偏振光视觉?

在回答这个问题之前,有必要先介绍一下偏振光。众所周知,光是一种电磁波,其振动方向与传播方向相垂直,自然光可以朝任意方向振动,而偏振光只能朝一个方向振动。这就好比把一束光波看成一根绳子,绳子的一端系在木桩上,另一端拿在孩子的手上,绳子会随着孩子的手抖动,就好比产生了振动波,这时波的振动可以朝任意方向,好比自然光;但如果把绳子穿过一个篱笆的缝隙,绳子就只能沿着缝隙的方向振动了,这

就是偏振光的原理。太阳光进入地球大气层后，遇到其中的气溶胶和微小颗粒会发生散射，其结果是一部分太阳光变成了偏振光。以太阳为中心，天空偏振光就如许多同心圆一样向外排列，这就是天空的偏振模式，据此可以有效地定位太阳的位置。

人类的眼睛无法直接看到偏振光，但是许多昆虫却能轻易看到。这种神奇的本领与昆虫眼睛的特殊结构有很大关系。

昆虫的眼睛称为复眼，由几十个到几千个紧密排列的六边形小眼组成。小眼的内部结构类似一台照相机。它的外层是可以透光的结构（角膜和晶锥），好似照相机的镜头；内层是感杆束，就如照相机的底片。感杆束通常由8个感光细胞伸出的杆状微绒毛组成，微绒毛内排列着大量的被称为“视紫红质”的感光颗粒。这种感光颗粒可以将光信号转化为化学信号，然后再传递给感光细胞。通过光—感光颗粒—微绒毛—感光细胞的信号传递，小眼就能“看”到一个小的图像，许多小图像最终汇集成了一个大图像，昆虫就看到了周边的环境。

在复眼的背部边缘区域，有一群专门负责感应偏振光的小眼，称为背部边缘区域（DRA）小眼。DRA小眼的感杆束排列着两组相互垂直的微绒毛。一组微绒毛对应于一个方向的偏振光，另一组微绒毛对应于垂直方向的偏振光。两组微绒毛相互协作就能分辨入射偏振光的振动方向。不仅如此，科学家们在昆虫的大脑中还发现了许多被称为“偏振拮抗神经元”的神经细胞。这些神经细胞可以受到振动方向不同的偏振光的刺激，并形成反馈机制来告诉昆虫入射偏振光的振动方向。

由于具有复眼和相应的神经细胞，昆虫就具备了感应偏振光振动方向的神奇能力，这就是昆虫的偏振光视觉。利用偏振光视觉，昆虫可以探测到天空的偏振光模式，进而判断自身与太阳的位置关系，使昆虫可以随时知道自己的位置，就像随身携带的全球定位导航系统一样。而且，偏振光视觉非常稳定，即使太阳被云彩或者植物遮住，只要能看到一小片天空就能发挥作用。

帝王蝶就能利用偏振光视觉，在飞行的过程中随时定位太阳的位置，并借此确定自己的方向，

最终抵达目的地。箭蚁和蜚螂在觅食的时候，也在不断整合自己在相对偏振模式的方向上所走的步数，以计算归巢的方向，因而能在找到食物后，沿最短的距离返回巢穴。

蜉蝣是如何聚集的？

蜉蝣的成虫是会飞行的陆地昆虫，但它们的幼虫却是水生的，因此成年的蜉蝣必须将卵产在水面上，才能保证幼虫存活。可是，蜉蝣成虫的生命只有几小时到两天的时间，所以，尽快找到水体产卵是它们成功繁衍后代的关键。那么，蜉蝣是如何迅速找到水的呢？

原来，除了大气散射形成的偏振光以外，自然界还有另外一个偏振光源，就是水面反射偏振光。水面反射而来的光线有时强烈到让人无法睁眼。这种水面反射的光线中就蕴含了大量振动方向水平的偏振光，而且非常强烈。蜉蝣通过偏振光视觉，可以轻易地探测到这些反射而来的偏振光，并循着光的传播方向找到水源并产卵。许多水生昆虫，如水龟子、龙虱和水虿（音：mǐn）等，也通过这种方式找到水源栖息地。

然而，光滑路面和车辆的表面也很容易反射光线形成偏振光源，导致蜉蝣误以为那里是可以产卵的水面。许多“上当受骗”的蜉蝣就会把卵产在这些物体上面，但是由于没有水，产在这里的卵自然不能孵化和成活。类似的“悲剧”在其他水生昆虫中也屡屡发生，但只要有小部分能成功地把卵产到水体里，种群就可以延续下去。

偏振光视觉意义重大，它让小小的昆虫在长途迁徙中不致迷失方向，在错综复杂、瞬息万变的自然界中找到回家的路，在严苛的环境下得以繁衍生息，这是昆虫进化出的有力武器，也是自然选择创造的生命奇迹。

目前，有关昆虫偏振光视觉的导航机理还没有彻底研究清楚。但是，这方面的仿生应用已经取得了可喜的进展，仿照箭蚁复眼研发的偏振光敏感元件已经问世，并尝试应用于无人机和仿生机器人的导航系统当中。有关昆虫偏振光视觉的研究领域大有可为。

本文受到国家重点基础研究计划（973计划）项目（2011CB302102）的资助。

（作者单位：中国科学院动物研究所）