

仿生偏振光导航方法

高 隼 范之国 著



科学出版社

仿生偏振光导航方法

高 隼 范之国 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

基于自然偏振特性的仿生偏振光导航是利用地球自然属性之一的大气偏振模式,获取罗盘信息的一种新型自主仿生导航方法,涉及生物学、信息科学、光学、大气科学等多门学科,是多学科的交叉与融合。本书从自然界的偏振现象出发,介绍了生物的偏振视觉、沙蚁的导航行为学及其偏振光感知机理,在此基础上详述了仿生偏振光导航传感器设计、航向译码模型的建立和大气偏振模式的特性和表征方法,最后介绍了基于大气偏振模式的罗盘信息获取方法和仿生偏振光导航平台。

本书可供从事仿生导航、组合导航、大气偏振光学方面工作的科研人员和工程技术人员阅读,也可供智能信息处理、电子信息科学与技术、计算机科学与技术、控制科学与技术等相关专业研究生和本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

仿生偏振光导航方法 / 高隼, 范之国著. —北京: 科学出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-03-042097-8

I. ①仿… II. ①高… ②范… III. ①仿生-应用-偏振光-灯光导航
IV. ①U675.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 230145 号

责任编辑:任 静 / 责任校对:张怡君
责任印制:肖 兴 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 10 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 10 月第一次印刷 印张: 11 3/4 插页: 2

字数: 224 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着科技的发展,仿生学及其应用逐渐进入各个领域。在丰富多彩的自然界中,种类繁多的生物经过亿万年的漫长进化和自然选择,具备了极其精确和完善的适应内外环境的能力,其中许多精巧的结构和优异的功能都令人叹为观止。仿生学在综合生命科学、物质科学、数学、力学、信息科学和工程技术的基础上,研究生物系统的结构、性状、原理、行为,为工程技术提供新的设计思想和工作原理。

导航是一种为移动载体的航行提供连续、安全和可靠的方向信息,使其安全、准确地沿着所选定的路线到达目的地的技术。导航技术是随着人类政治、经济和军事活动的产生而产生并不断发展的,现如今无论在军事还是在民用领域,都有着极为广泛的应用,目前主要的导航方式有卫星导航、惯性导航、地磁导航和天文导航等。

基于自然偏振特性的仿生偏振光导航方法利用地球自然属性之一的大气偏振模式作为罗盘信息的来源,是一种基于被动、无源的新型自主导航方法,其涉及生物学、信息学、光学、大气科学等多门学科,是多学科的交叉与融合。由于在较大范围内很难受到人为因素的干扰,隐蔽性强、鲁棒性好,是现有导航方式的重要补充,可以为地面机动设备、近地空间飞行器等提供新的导航与定位手段,对解决弱、无卫星的陌生环境下自主导航与定位具有重大的意义。

仿生偏振光导航的研究以沙蚁等生物复眼的偏振光感知机理及其 POL-神经元的偏振信息处理机制为仿生基础,以太阳光在大气中传输的偏振特性为理论依据,从信息获取和信息处理的角度实现对大气偏振模式的智能感知、信息获取、特征提取和姿态确定。

本书共分 10 章,第 1 章介绍自然界中奇特的偏振现象和生物实现导航功能的偏振视觉;第 2 章在介绍沙蚁偏振光导航行为学实验的基础上,总结了沙蚁导航的信息来源与路径积分导航和地标导航的协作机制;第 3 章分析了沙蚁复眼的偏振光感知机理和其 POL-神经元的偏振信息处理机制;第 4 章详述了仿生偏振光导航传感器的仿生模型和设计原理;第 5 章讨论了仿沙蚁 POL-神经元响应的航向译码模型和从大气偏振模式信息中提取航向信息的 APPO 模型;第 6 章探讨了生物偏振光导航中的“紫外悖论”问题,解释了生物获取偏振光的波段选择机制;第 7 章讨论了表征大气偏振模式的瑞利模型、Berry 表征方法和蒙特卡罗散射模型,以及散射平面的复模型表征方法;第 8 章介绍了大气偏振模式的检测方法,讨论了环境因素对大气偏振模式产生的影响,并分析了大气偏振模式作为导航信息源的特

殊性质;第9章详述了大气偏振模式的导航方法,分别介绍了基于偏振模式对称性参数反演的航向获取算法和基于偏振模式图像对称性检测的航向获取方法;第10章介绍了仿生偏振光导航平台的设计和外场实验的开展。

本书的相关研究成果是在合肥工业大学“图像信息处理研究室”几届博士生和硕士生协助下完成的,在此向曾经和正在为“仿生偏振光导航”研究付出辛苦和汗水的王昕、田柳、王子谦、高丽娟、吴良海、潘登凯、崔帅、胡翊、何均均、范宁生、杨姜伟、王波等表示感谢。

本书是在中国科学院“百人计划”、国家863项目和国家自然科学基金项目(61102153, 61271121)的资助下完成的,在此特向国家863专家组和国家自然科学基金委员会等表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,加上仿生偏振光导航领域本身不断丰富和发展,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 生物的偏振视觉	1
1.1 自然界中的偏振现象	1
1.2 大气偏振模式	2
1.3 生物的偏振视觉	4
1.4 仿生偏振光导航的内涵	6
参考文献	7
第 2 章 沙蚁的导航行为学	9
2.1 沙蚁的导航机制	9
2.2 沙蚁导航信息的来源	10
2.3 偏振光导航	11
2.3.1 沙蚁的偏振光罗盘	11
2.3.2 沙蚁的里程计	16
2.4 地标导航	19
2.4.1 地标导航行为	19
2.4.2 Snapshot 模型	21
参考文献	22
第 3 章 沙蚁的偏振光感知机理	24
3.1 复眼	24
3.1.1 复眼的结构	24
3.1.2 DRA	26
3.1.3 沙蚁的复眼	28
3.2 POL-神经元	29
3.2.1 POL-神经元的响应机制	29
3.2.2 偏振敏感神经系统	31
参考文献	33
第 4 章 仿生偏振光导航传感器	34
4.1 仿生模型	34
4.1.1 偏振光感知模型	34
4.1.2 偏振信息处理过程	35

4.2	传感器的设计	37
4.2.1	传感器的结构	37
4.2.2	传感器的电路	39
4.3	误差分析	41
4.3.1	传感器的标定	41
4.3.2	测角误差分析	45
4.3.3	误差补偿方法	47
	参考文献	51
第5章	仿沙蚁偏振光导航的航向译码模型	53
5.1	沙蚁偏振信息处理的模型猜想	53
5.2	仿沙蚁 POL-神经元响应的航向译码模型	55
5.2.1	模型结构	56
5.2.2	模型验证	57
5.3	APPO 模型	60
5.3.1	模型结构	61
5.3.2	模型训练	62
5.3.3	模型仿真	66
	参考文献	68
第6章	生物偏振光导航的紫外悖论	70
6.1	紫外悖论的十种假设	70
6.2	偏振光测角的光谱特性	73
6.2.1	测试方法	73
6.2.2	不同光谱下的测角结果	74
6.3	紫外悖论的解释	78
	参考文献	80
第7章	大气偏振模式的表征	82
7.1	粒子散射原理	82
7.1.1	瑞利散射原理	82
7.1.2	米氏散射原理	84
7.2	大气偏振模式的瑞利表征方法	88
7.2.1	光线传输坐标系	88
7.2.2	瑞利散射模型	89
7.3	大气偏振模式的 Berry 表征方法	91
7.3.1	天空中的中性点	91

7.3.2 Berry 散射模型	92
7.4 蒙特卡罗散射模型	94
7.4.1 蒙特卡罗算法过程	94
7.4.2 蒙特卡罗算法建模表征	96
7.5 散射模型的复平面表征	97
参考文献	100
第 8 章 大气偏振模式的特性	101
8.1 偏振模式检测方法	101
8.2 瑞利天气下的偏振模式	103
8.2.1 全天偏振模式的变化特性	103
8.2.2 大气偏振模式的光谱特性	107
8.3 环境因素对大气偏振模式的影响	109
8.3.1 天气因素对偏振模式的影响	109
8.3.2 地表因素对偏振模式的影响	112
8.4 大气偏振模式的对称性	114
8.4.1 大气偏振模式对称性理论解析	114
8.4.2 实际大气偏振模式对称性	117
参考文献	120
第 9 章 大气偏振模式导航方法	121
9.1 导航坐标系与参考基准	121
9.1.1 坐标系定义	121
9.1.2 参考基准	123
9.2 局部天空偏振模式导航方法	124
9.2.1 单传感器航向角获取	124
9.2.2 测角歧义性问题	125
9.2.3 局部天空导航方法的局限性	127
9.3 全天空偏振模式导航方法	128
9.3.1 对称性模型与提取方法	128
9.3.2 航向角计算方法	130
9.4 偏振模式对称性参数反演的航向角获取算法	133
9.4.1 算法思想	133
9.4.2 算法实现	134
9.4.3 结果分析	139
9.5 偏振模式图像对称性检测的航向角获取算法	141

9.5.1 算法思想	142
9.5.2 算法实现	142
9.5.3 结果分析	147
参考文献	150
第 10 章 仿生偏振光导航平台	152
10.1 利用偏振光信息的导航策略	152
10.1.1 单信息源的偏振光导航方法	152
10.1.2 多信息源组合导航方法	154
10.1.3 基于仿生偏振光/GPS/地磁的多信息源组合导航方法	156
10.2 组合导航平台	160
10.2.1 平台总体结构	160
10.2.2 系统架构	161
10.2.3 系统控制方案	163
10.2.4 组合导航平台的实现	166
10.3 实验与分析	168
10.3.1 单信息源的仿生偏振光导航实验	168
10.3.2 偏振光/GPS/地磁多信息源组合导航实验	171
参考文献	178
彩图	180

第 1 章 生物的偏振视觉

偏振是光的固有属性,反映了光在传播过程中,光波振动方向随时间的变化规律。自然界中,光的偏振现象普遍存在。虽然人类的视觉无法直接感知偏振光,但是许多生物(如沙蚁、蝗虫、蜜蜂、墨鱼等),能够利用它们独特的眼睛结构,感知并利用光的偏振现象,获取信息,从而进行导航、觅食和交流。这些生物经过亿万年的漫长进化和自然选择,形成了独特的偏振视觉功能,具备了完善的适应环境的能力,得以生存和发展;其许多精巧的结构和优异的功能,在令人类叹为观止的同时,更值得我们学习、了解,并加以合理的利用。

1.1 自然界中的偏振现象

光是一种重要的自然现象,光波属于横波,即光矢量与光波传播方向垂直,在与传播方向垂直的二维空间中光矢量存在不同的振动状态,称为偏振态,光波的偏振现象是光矢量性的直接表现。

自然界中,太阳光是最常见,也是最主要的光源,太阳光在进入大气层之前是无偏的。太阳对地球的辐射过程,是一种能量传输和转换的过程。地球大气由多种气体和悬浮于其中的固体粒子、气体粒子组成,太阳辐射的过程中会受到大气的吸收、散射等影响,其强度、传输方向和偏振态都会发生改变,从而产生了偏振现象。其实,蓝天、白云、彩虹等都是由于大气粒子对太阳光的散射等作用而产生的。

以单次瑞利散射为例,如图 1.1 所示。无偏的太阳光进入大气层后,受到大气分子的散射作用,当散射角度为 90° 时,散射光的偏振度为 100%,即完全线偏振光,当散射角度为 0° 时,散射光的偏振态将不发生改变,散射角介于二者之间时,将产生部分偏振光。由于存在大量大气分子的多次散射,天空中的太阳光只能是部分偏振光。另外,大气中除了氮、氧等大气分子,还存在水滴和气溶胶等粒子,这类粒子主要产生消偏效应,会不同程度地削弱偏振光。因此即使在非常晴朗的天气情况下,偏振度最大值通常也小于 70%。

此外,物体表面的反射也会改变光的偏振特性。物质在光的照射下,也会形成各种不同的偏振特性。不同物质由于其物理属性和结构的不同,在光的照射下,对光矢量的振动方向和相位都将引起变化,形成各自不同的偏振特性。反射光的偏振特性差异与其自身的导电特性密切相关。例如,金属材料和非金属材料对偏振光的反射响应,就具有极大的差别,这在军事探测上得到丰富的应用。同时导电特

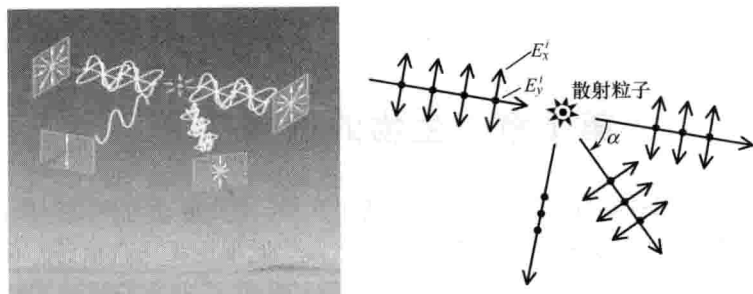


图 1.1 大气粒子散射

性相近的不同物体,其表面的粗糙程度不同进而引起漫散射程度存在差异,导致其反射光偏振响应也具有较大的不同。

因此自然界中,偏振现象无处不在。这些偏振现象与物质的属性和结构等特征密切相关,能够帮助我们分析认识物质的本征特性,深入研究自然界中各种不同的偏振现象,是进一步了解自然、认知自然的重要途径。

1.2 大气偏振模式

大气偏振模式是太阳光在大气传输过程中由于大气的散射、辐射和吸收作用而产生的偏振光所形成的特定的偏振态分布,是地球重要的自然属性之一。

大气偏振模式可由偏振强度场和偏振方向场等信息进行表征,偏振强度场与光的偏振度分布相关,偏振方向场与光的电矢量(也称为 E -矢量)分布有关,大气偏振模式在时间、地点和环境因素的共同作用下,呈现出一系列的时空连续分布特性。由于大气偏振模式是太阳光在经过大气层的过程中,由各种内部与外部因素共同作用下的产物,大气偏振模式中蕴涵重要的信息,能体现出系统内部各要素的运动规律和外部环境的扰动关系。因此,大气偏振模式在大气环境监测与预报、对地光学遥感、偏振成像与目标识别、偏振光导航等领域,具有重要的科学研究意义与广泛的应用价值。

理想情况下的大气偏振模式分布图如图 1.2 所示^[1],短线的粗细表示偏振强度场的分布模式,短线的方向表示线偏振光的 E -矢量分布模式。其中图 1.2(a) 是三维表示形式,图 1.2(b) 是其平面投影, O 点为地面观察位置, Z 为天顶, S 是太阳所在的位置, SM 表示太阳子午线, ASM 表示逆太阳子午线。太阳子午线与逆太阳子午线连线用 $SM-ASM$ 表示。

理想情况下,任意观测位置下的天空大气偏振模式具有相对稳定的特征,存在两条基本的对称线:一条是过太阳和天顶的 $SM-ASM$,大气偏振模式的偏振度关

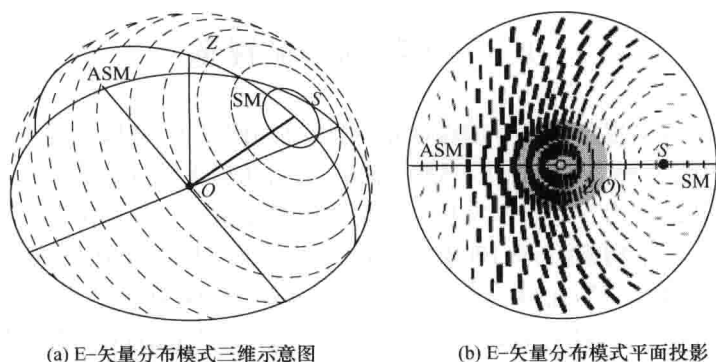


图 1.2 理想情况下的大气偏振模式分布图

于 SM-ASM 对称分布, E-矢量方向关于 SM-ASM 逆对称分布; 另一条是与太阳角距为 90° 的最大偏振线, 大气偏振模式关于最大偏振线对称, 在对称线所在的位置, 偏振度最大, 距离对称线越远, 偏振度越小, 太阳子午线附近的偏振度要小于逆太阳子午线附近的偏振度。随着太阳的向西运动(大约每小时 15°), 太阳高度角和方位角不断变化, 对称线和整个大气偏振模式以天顶为中心旋转, 但大气偏振模式始终保持对称性。

实际情况下, 大气环境远比理想大气环境复杂, 大气中存在尘埃、烟粒, 以及由水和冰组成的云雾、冰晶和雨雪等大气气溶胶粒子, 它们对大气的偏振分布状态会产生重要的影响, 尤其在多云、雾霾、雨雪等天气, 自然光受气溶胶粒子的影响, 不仅发生瑞利散射, 还存在米氏散射, 不仅需要研究球形粒子散射, 更要研究非球形粒子的散射理论。因此, 实际情况下的大气偏振模式更为复杂。

1808 年法国物理学家 Malus 首次发现了偏振现象, Brewster 和 Babinet 等曾对偏振现象进行过早期的观测, 1871 年 Rayleigh 创立了瑞利散射理论^[2], 1908 年德国物理学家 Mie 提出米氏散射理论^[3], 瑞利散射理论和米氏散射理论能够合理地解释大气分子形成的散射光的偏振特性, 这些散射理论奠定了大气偏振模式研究的理论基础^[4-6]。

目前大气偏振模式模型中主要包括瑞利散射模型、奇异值模型^[7]和蒙特卡罗随机传输模型^[8]等。最为经典的是根据瑞利散射理论建立的瑞利散射模型, 根据 Horváth 等的观测, 瑞利散射理论能很好地描述晴朗天气下大气偏振模式总体特征^[9,10]。Berry 等把天空中存在的中性点和拓扑学中的奇异值点相联系, 提出一种基于拓扑学的大气偏振模型^[7]。文献[8]摒弃了传统的大气层模型, 根据蒙特卡罗建模方法对大气偏振模式进行描述, 这种方法不需要以观测参数作为先验知识, 能反映非理想情况下的大气偏振模式的一些特性。

1.3 生物的偏振视觉

自然界中许多生物都具有偏振视觉,可以感知偏振光,获取更加丰富的视觉信息。自 20 世纪上叶,沙蚁、蝗虫、蜜蜂、狼蛛^[11-15]、北美大花蝶^[16]等,不断被发现具有偏振光感知的能力。生物学家甚至发现非洲粪金龟可以利用微弱的月光偏振进行导航^[1]。这些生物偏振感知现象的发现,使得人们对生物的偏振视觉产生了浓厚的兴趣,这也拉开了人们对生物偏振视觉及其相关问题研究的序幕。

20 世纪 30 年代,就有研究学者通过实验发现了甲虫幼虫对线偏振光具有反应。1940 年 Verkhovskaya 在对果蝇的试验中,首次发现了生物可以区分偏振光和非偏振光的现象,1949 年 Frisch 首次证明了对天空偏振光的感知是蜜蜂一种很重要的导航途径^[11,12]。1985 年 Wehner 和 Rossel 首次发现了沙蚁可以利用天空偏振光进行导航^[17]。在随后的研究中人们发现,根据偏振视觉的不同功能,生物利用偏振视觉具备颜色分辨、目标识别和导航定位等功能,如图 1.3 所示。

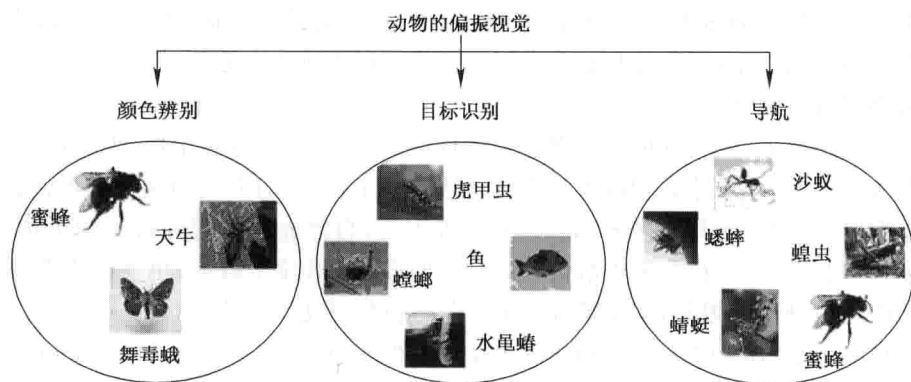


图 1.3 生物偏振视觉具备的主要功能

1. 颜色分辨

很多昆虫能够根据光的频率差感知和分辨颜色,其中对蓝-绿光部分和紫外光部分特别敏感。由于自然物体对紫外光的反射是有差别的,虽然人眼捕捉不到,但是在昆虫的视觉中可以形成特定的“图案”。同样由于紫外光的不同反射,在人眼中单一颜色的花朵,昆虫可以获得更多的色彩信息。奥地利生物学家弗里希发现,蜜蜂能够从灰色背景中感知得到蓝色和黄色信息,并在其采蜜过程依靠这种对颜色的分辨能力探寻“花源地”。一种名叫“三爪螯”的捻翅目昆虫也具有类似的颜色分辨能力,在实验中它们较多地趋向紫红色、橙色和黑色,而较少的趋向蓝色、蓝绿

色、黄绿色和白色。一种名叫“舞毒蛾”的昆虫幼虫,在实验中表现出更强的颜色分辨能力,其在未经训练的条件下,就能在任何灰色背景中分辨出蓝色和黄色。

2. 目标识别

除了颜色辨别,昆虫的偏振视觉还具有目标识别的能力,可以帮助它们快速地发现食物。研究表明,虎甲的幼虫对运动的感知非常灵敏,利用偏振信息可以感知每秒 0.15° 的变化,同时它们可以对单个和多个运动物体进行分辨,并根据地面上不同的运动来辨认物体的形状。匍匐在植物花径上的螳螂能够利用其复眼的偏振视觉,在 0.05s 内一跃而起,吞下飞行中的小虫,在这 0.05s 内,它可以准确地测出飞虫的大小、飞行的方向和速度。水黽等昆虫在运动过程中可以使用分色光感受器降低水面造成的表面偏振反射,从而提高闪亮背景下的探测。此外很多水下生物也是利用检测偏振光的相关信息来捕获食物的,偏振敏感的食肉动物可以通过偏振模式感知伪装的猎物,由于目标的偏振特性与背景不同,有些透明的水生动物在偏振视觉中甚至都是可见的。

3. 导航定位

导航与定位是生物偏振视觉的另一个典型能力。如上所述,沙蚁、蝗虫、蜜蜂、墨鱼等都能够利用大气偏振模式进行导航与定位。

生活在北非沙漠中的沙蚁,在缺乏嗅觉和足够视觉信息的沙漠中漫游数百米觅食后,能够沿着几乎接近直线的路线返回它们的巢穴,如图1.4所示^[1,18]。研究表明:体重仅 10mg ,大脑只有 0.1mg 的沙蚁是利用其复眼中特殊的偏振神经感光结构,以极快的速度完成对存在复杂变化的大气偏振模式信息的检测和处理,提取出准确可靠的罗盘信息,实现导航与定位^[2,8-15]。这种特殊的偏振导航现象和惊人的导航能力,很早就引起了生物学家的关注。

蜜蜂和沙蚁一样,都是以巢穴为中心的社会性昆虫。奥地利生物学家弗里希,在20世纪40年代用一系列实验测出了蜜蜂的基本导航能力,证明了蜜蜂通常利用太阳作为罗盘进行导航,并指出蜜蜂是以太阳作为参考点,通过“舞蹈”的形式告诉其他蜜蜂如何到达它发现的花源地,弗里希认为蜜蜂的这些神奇的导航功能和其偏振敏感视觉有着紧密的联系。生活在南美洲的绿海龟,每年6月中旬成群结队地从巴西沿海出发,到达大西洋上的阿森松岛,在那里生儿育女后又返回老家,历时两个多月,行程两千多千米,经研究发现,它们的这种导航本领同样也是依赖于天空的偏振模式。新西兰的惠灵顿在1953年发现,将线性偏振器放置于家蝇上方时,家蝇会根据线偏振器的方向改变体轴的朝向,随后的实验证明家蝇在远距离的近似直线飞行中是以天空中的偏振光为参照的。生活在潮湿地带的蜉蝣是极好的游泳家,研究表明它们在夜间生活中仅利用偏振光,就能以时间补偿的导航机制

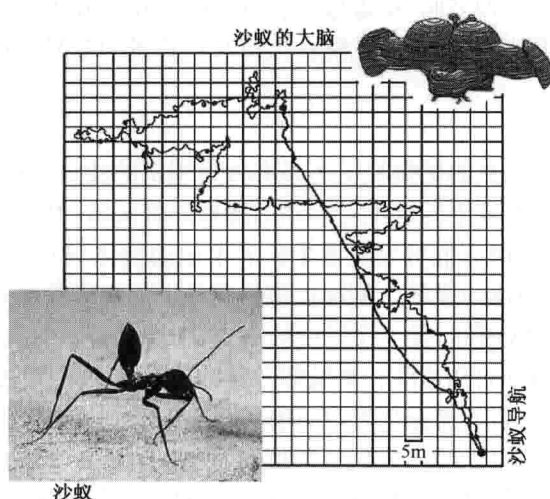


图 1.4 沙蚁的漫游与返回
右上为沙蚁大脑模型,左下为沙蚁

准确地从水中游回其跳入水域的海岸。除此之外,一些在夜间生活的昆虫如黄斑黑蟋蟀、平原蟋蟀、蝗虫、蟑螂、甲虫等也同样利用偏振光导航,水栖昆虫如水生甲虫、摇蚊等对水下偏振也极其敏感,可以利用其复眼通过探测水面反射光的水平偏振找到它们的栖息地^[16]。

综上所述,自然界中很多生物都具有人类所不具备的偏振视觉,特别是沙蚁等生物高度敏感的偏振视觉感知与导航功能,使得生物学家对沙蚁等如何利用天空偏振光进行导航定位的问题产生了浓厚的兴趣,这也拉开了人们对生物与仿生物偏振光导航研究的序幕。

1.4 仿生偏振光导航的内涵

仿生偏振光导航方法是一种新型基于自然特性的自主导航方法,是以沙蚁等生物高度敏感的偏振视觉感知与导航功能为仿生基础,以太阳光的自然偏振特性与大气偏振模式为理论依据,通过对大气偏振模式的检测和演算,实现对载体姿态信息的判断。

偏振光导航如同天文导航,是一种既古老又新型的导航方法,考古学研究发现,古代维京(Viking)人就掌握了利用太阳石等晶体感知大气偏振模式,实现了远洋航海^[9,10]。但是随着卫星导航、惯性导航等现代导航技术的兴起和应用,现代导航技术已经在人类的社会活动和军事活动中占据了主导地位,并发挥了至关重要的作用。近年来随着仿生科学的发展,以及人们对导航需求的无限追求,一批新型

导航方法不断被人们关注,基于自然偏振特性的仿生偏振光导航方法就是典型的代表。

仿生偏振光导航的关键理论主要包括:生物的偏振感知与导航机理、大气偏振模式理论、大气偏振信息获取技术等三个方面。如图 1.5 所示,沙蚁等生物特殊的偏振视觉感知与导航机理是偏振光导航的仿生基础,大气偏振模式相关理论是偏振光导航的理论依据,大气偏振模式信息的获取方法和实现技术则是偏振光导航的实现手段。

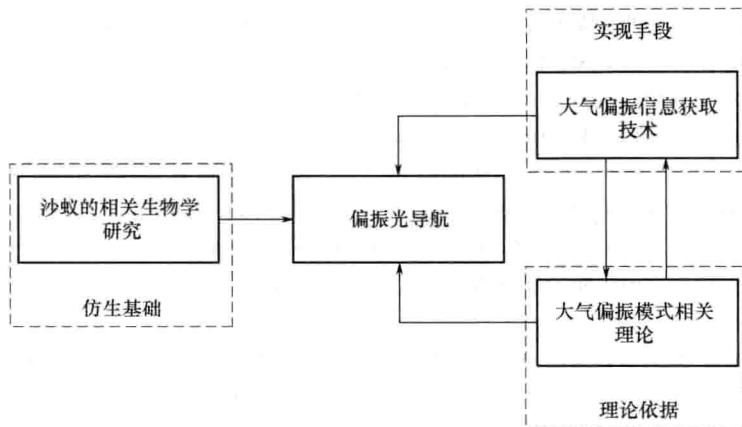


图 1.5 仿生偏振光导航方法的研究内涵

仿生偏振光导航研究首先属于仿生学研究范畴,遵循仿生学的研究规律。仿生偏振光导航就是以沙蚁等生物高度敏感的偏振视觉系统为仿生的生物原型,通过对沙蚁偏振视觉系统的生物结构、神经系统的响应机理及其信息处理机制的研究,提出生物模型。其次仿生偏振光导航方法是以大气偏振模式相关研究为理论基础,大气偏振是由太阳和大气状态共同决定的偏振态分布模式,因此偏振光导航的研究是以光学和大气科学的相关理论为依据,是偏振光学的发展和应用。

参考文献

- [1] Dacke M, Nilsson D E, Scholtz C H, et al. Animal behaviour: insect orientation to polarized moonlight. *Nature*, 2003, 424 (6944): 33
- [2] Rayleigh L. On the light from the sky, its polarizaiton and color. *Philosophical Magazine*, 1871, 61: 107-279
- [3] Mie G. Beitrage zur optik triiber medien. Speziell Kolloidaler Metallosungen *Annalen Der Physik*, 1908, 25: 337-445
- [4] van de Huist H C. *Light Scattering by Small Particles*. New York: Wiley, 1957: 2-5

- [5] Kerker M. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation, Academic Press, New York; Academic, 1969; 1-3
- [6] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York; Wiley, 1983; 2-6
- [7] Berry M V, Dennis M R, Lee Jr R L. Polarization singularities in the clear sky. New Journal of Physics, 2004, 6; 1-14
- [8] Jessica R R C, Scott R A, Stevens J L. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media; part I. Opt Exp, 2005, 13 (12): 4420-4438
- [9] Pomozi I, Horváth G, Wehner R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds; full-sky measurements and implications for animal orientation. The Journal of Experimental Biology, 2001, 204; 2933-2942
- [10] Horváth G, Varjú D. Polarization pattern of freshwater habitats recorded by video polarimetry in red, green and blue spectral ranges and its relevance for water detection by aquatic insects. The Journal of Experimental Biology, 1997, 200; 1155-1163
- [11] Horváth G, Varjú D. Polarized Light in Animal Vision. Berlin; Springer Verlag, 2004; 107
- [12] Labhart T. Polarization-opponent interneurons in the insect visual system. Nature, 1988, 331; 435-437
- [13] Labhart T. How polarization-sensitive interneurons of crickets see the polarization pattern of the sky; a field study with an optoelectronic model neurone. The Journal of Experimental Biology, 1999, 202; 757-770
- [14] Temple S E, Pignatelli V, Cook T, et al. High-resolution polarisation vision in a cuttlefish. Current Biology, 2012, 22 (4); R121-R122
- [15] Dacke M, Doan T A, Ocarroll D C. Polarized light detection in spiders. The Journal of Experimental Biology, 2001, 204; 2481-2490
- [16] Reppert S M, Zhu H S, White R H. Polarized light helps monarch butterflies navigate. Current Biology, 2004, 14 (1); 155-158
- [17] Wehner R, Rosell S. The bee's celestial compass: a case study in behavioural neurobiology. Fortschr Zool, 1985, 31; 11-53
- [18] Wehner R. Desert ant navigation; how miniature brains solve complex tasks. Journal of Computational Physics, 2003, 189; 579-588