

文章编号: 0258-7025(2010)08-2015-05

基于视觉仿生原理的四通道时分复用大气偏振检测技术

黄旭锋^{1,2} 步扬^{1,2} 王向朝^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 大气偏振图景检测精度直接决定了系统载体的导航定位精度。基于视觉仿生原理,提出了一种四通道时分复用(TDM)大气偏振图景检测技术。该技术采用 2 组 4 个探测通道和时分复用技术实现大气偏振信号分时检测,获得大气偏振图景信息。与已有技术相比,该技术既简化了测量系统,又有效减少了通道信号增益差异与大气光强变化对探测信号的影响。实验表明,基于视觉仿生原理的大气偏振检测技术能够明显降低大气偏振测量误差,提高大气偏振测量精度。基于该技术的仿生偏振检测系统能够获得定位级的星体位置信息,实现载体的自主导航定位。

关键词 大气光学; 大气偏振; 偏振检测; 仿生; 时分复用

中图分类号 O432.2; O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103708.2015

Four-Channel Time Division Multiplexing Atmospheric Polarization Measurement Technique Based on Vision Bionics

Huang Xufeng^{1,2} Bu Yang^{1,2} Wang Xiangzhao^{1,2}

¹ Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The navigation and positioning accuracy is mainly dependent on measurement accuracy of atmospheric polarization imaging. A four-channel time division multiplexing (TDM) atmospheric polarization measurement technique based on bionic principle is proposed and investigated. The technique measures atmospheric polarization signals with four detecting channels based on TDM. Compared with developed techniques, the technique simplifies measurement system and decreases effects from channel signal gain difference and atmosphere signal intensity change. Experimental results show that the technique significantly reduces measurement error and improves measurement accuracy of atmospheric polarization. A measurement system based on the technique can obtain reliable position information of the star for navigation and positioning.

Key words atmospheric optics; skylight polarization; polarization measurement; bionic; time division multiplexing

1 引言

偏振光导航定位技术具有抗干扰能力强、性能可靠、适用范围广和定位误差不随时间累计等优点,是一种具有很大发展潜力的导航定位技术^[1~3]。该技

术通过准确检测与分析大气偏振图景信息,获得太阳、月亮等星体准确位置,从而实现系统载体的导航与定位。大气偏振检测技术是该导航定位技术的核心技术,其检测精度直接决定了系统导航定位精度。

收稿日期: 2009-12-18; 收到修改稿日期: 2010-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(60878029, 60938003)、上海市启明星项目(08QB14005)和上海市科委国际合作研究项目(08520704200)资助课题。

作者简介: 黄旭锋(1978—),男,博士研究生,主要从事大气偏振检测技术方面的研究。E-mail: hx1979@gmail.com

导师简介: 王向朝(1957—),男,研究员,博士生导师,主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

国内外对偏振光导航定位技术都进行了相关的研究,这些研究主要针对大气偏振特性方面^[1,4~6],瑞士苏黎世大学研究组^[1]已经实现了载体的基本导航功能,采用了基于三单元 6 个独立探测通道的检测系统,探测通道多,通道之间的信号增益差异大,并且通道需要旋转以寻找极值点。这导致系统结构复杂,测量速度慢,测量精度低。系统仅获得了导航级的太阳位置信息,其精度只能满足载体方向导航功能的要求,不能满足载体自主定位功能的要求^[7]。为了提高系统测量精度和测量速度,达到基本的导航定位要求,本文根据视觉仿生原理,提出一种基于四通道时分复用(TDM)技术的大气偏振图景检测技术,并对该技术进行了实验验证。

2 基本原理

2.1 偏振视觉仿生原理

太阳光本身是自然光,不具有偏振性。当它进入地球大气层时,它受到 N_2 , O_2 等大气分子与雾滴、水和冰晶等液体、固体颗粒的散射,变成在某一方向上振动占优势的部分偏振光^[8,9],如图 1 所示。这个占有优势的振动方向跟太阳位置有关,它垂直于太阳、观测点和探测器组成的平面,并随着太阳的移动而发生相应的变化^[1,10~14]。通过高精度测量偏振的优势方向获得大气偏振图景,就能得到太阳在天球坐标系中的准确位置,从而实现载体的自主导航与定位。系统偏振图景测量精度决定了载体导航与定位精度。

自然界中蜜蜂、蚂蚁和蟋蟀等昆虫能够根据天空偏振光方向与偏振度大小准确地确定太阳、月亮等天空星体的方位。即使飞出几十千米之外,昆虫

也能准确地返回巢穴^[13,15]。昆虫这种特性来源于其特殊的视觉神经系统^[1]。该系统包括眼睛视觉探测子系统与神经中枢信号处理子系统两部分。前者对大气偏振图景的强度和方向分布进行测量,后者则对其测量信号进行综合处理计算。以蟋蟀为例,其眼睛是由多组偏振敏感单元复眼组成的,如图 2 所示。每一组单元复眼又由两个检偏方向成正交排列的单眼组成,每一个单眼仅对与它同向的偏振光敏感,其输出响应为正弦曲线。不同偏振敏感单眼感知天空中不同方向的偏振光强度,并在视网膜上映射一个大气偏振分布图,如图 1 所示。神经中枢系统先将每一组单元复眼的两个单眼响应进行对数相减预处理,再将其输出作为输入汇合到中枢神经层的视神经叶部[图 2(b),(c)]。视神经叶部的中间神经元并行接受和处理视网膜上每一组单元复眼的偏振响应。该响应输出至罗盘神经元,经过计算就可以得出蟋蟀体轴与太阳子午线夹角,从而实现其方位导航。

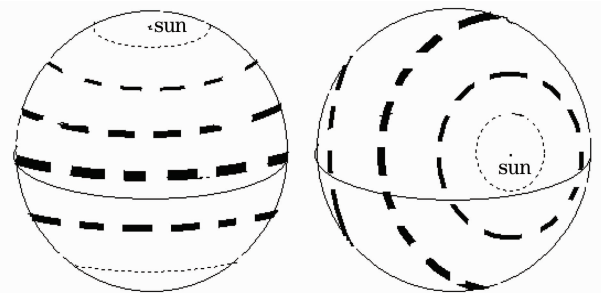


图 1 不同时刻的天空大气偏振图景。图中黑线宽度正比于该点偏振度,黑线方向表征该点偏振方向
Fig. 1 Polarization pattern at different times. The width of the black line represents the polarization degree, the direction of it represents the polarization direction

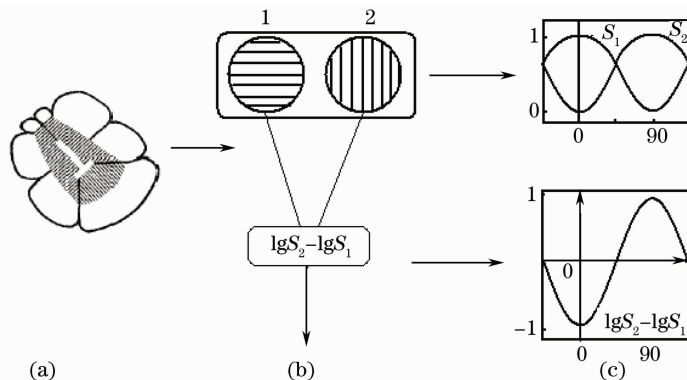


图 2 蟋蟀复眼结构图。(a)偏振敏感单元复眼;(b)检偏方向成正交排列的单眼及信号处理示意图;(c)信号输出示意图
Fig. 2 Compound eye structure of the cricket. (a) polarization-sensitive compound eye unit; (b) orthogonal polarization-opponent and signal processing; (c) output signal of the polarization-opponent

2.2 基于视觉仿生原理的偏振检测技术

昆虫偏振检测原理可以简要描述为：每一组单元复眼中检偏方向成正交排列的两个探测单元检测偏振信号；两个探测单元输出信号作对数相减预处理作为每一组单元复眼的输出；所有单元复眼的输出信号并行输入到神经元；神经元对信号进行计算，得到导航信息。根据该偏振检测原理，提出了 2 组四通道时分复用大气偏振图景检测技术，并采用类似昆虫复眼的测量结构研制了大气偏振图景检测系统，如图 3 所示。

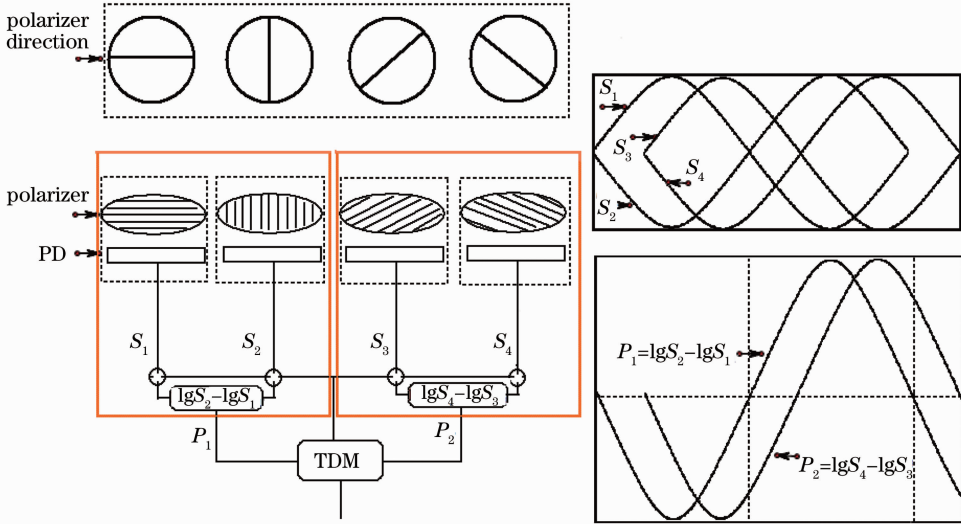


图 3 大气偏振图景检测系统原理示意图

Fig. 3 Principle diagram of the polarization pattern measurement system

该系统采用 2 组检偏单元(S_1 与 S_2 , S_3 与 S_4)，每组检偏单元由 2 个检偏方向正交的偏振探测通道组成。每个通道的探测器接收到的光强为^[1]

$$S_n = KI[1 + d\cos(2\phi_n - 2\phi_{\max})], \quad (1)$$

式中 $I = I_{\max} + I_{\min}$, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为光强的最大和最小值； d 为偏振度； n 为检偏单元组数； ϕ 为测量偏振方向与偏振标定方向之间夹角， ϕ_{\max} 是光强为 I_{\max} 时的 ϕ 值； K 是比例常数。系统中，偏振标定方向设定为第一个检偏器(S_1) 的偏振方向。由于偏振优势方向垂直于太阳、观测点和探测器组成的平面，因此通过测量 ϕ 值即可确定系统偏振标定方向与太阳的相对角度。 ϕ 值测量精度决定了导航定位系统的最终精度。

类似昆虫信号预处理过程，对每组检偏单元的两个偏振探测器输出信号做对数相减，则检偏单元输出信号

$$\begin{cases} P_n = \lg\left[\frac{1 - d\cos(2\phi_n)}{1 + d\cos(2\phi_n)}\right], \\ \phi_n = \phi - \theta_n \end{cases} \quad (2)$$

式中 θ_n 为每一组检偏单元的主检偏方向与系统偏振标定方向的夹角。

通过对信号进行对数相减，该检偏单元输出信号与输入光强信号 I 和比例常数 K 无关，仅与偏振度 d 及角度参数 ϕ 相关。为了降低偏振度 d 对测量

出信号并行输入到神经元；神经元对信号进行计算，得到导航信息。根据该偏振检测原理，提出了 2 组四通道时分复用大气偏振图景检测技术，并采用类似昆虫复眼的测量结构研制了大气偏振图景检测系统，如图 3 所示。

信号的影响，提高角度 ϕ 的测量精度，系统采用多组检偏单元同时测量大气偏振图景。

实际制作过程中，由于每个探测器都是独立检测大气偏振信号，每个探测器的电路增益与初始偏振夹角 θ_n 存在偏差，因此，偏振探测器和信号处理电路数量的单纯增加，不会提高系统测量精度。如果每个偏振探测器的电路增益相同，根据(2)式，实际只需 2 组检偏单元即可确定角度参数 ϕ ，同时，这也可以减少初始偏振夹角 θ_n 的偏差对测量值的影响。

如图 3 所示，本系统采用了 2 组检偏单元和 4 个偏振探测通道。设定第二组检偏单元的主检偏方向(S_3 检偏方向)与系统偏振标定方向(S_1 检偏方向)成 45° ，则 2 组检偏单元输出信号分别为

$$\begin{cases} P_1 = \lg\left[\frac{1 - d\cos(2\phi)}{1 + d\cos(2\phi)}\right], \\ P_2 = \lg\left[\frac{1 - d\sin(2\phi)}{1 + d\sin(2\phi)}\right], \end{cases} \quad (3)$$

由(3)式可得

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan\left[\frac{(1 + 10^{P_1})(1 - 10^{P_2})}{(1 - 10^{P_1})(1 + 10^{P_2})}\right]. \quad (4)$$

为了使每个偏振探测器的电路增益相同，系统采用了多通道时分复用技术对探测器输出信号进行处理，如图 4 所示。通过检偏器与光电二极管(PD)

后的测量信号分时复用同一个前置放大电路进行滤波和放大,再经过同一个可变增益放大器与对数放大器进行信号处理,最终测量信号经过 A/D 转换进入计算机进行数据处理和分析。由于 4 个探测器的信号全部分时高频复用同一电路,每路信号的电路增益相同,因此,采用 4 个探测器连续测量大气偏振信号即可测量得到高精度的偏振光优势方向与偏振

图景。此外,在长期连续测量过程中,所探测的大气光信号的强度是不断变化的。采用同一组对数放大器与可变增益放大器对 4 路探测信号进行处理,不仅可以保证 4 路信号的稳定性和一致性,而且可以在信号过小时降低噪声的影响,在信号过强时避免探测信号饱和,从而大大降低了大气光信号的强度变化对测量结果的影响。

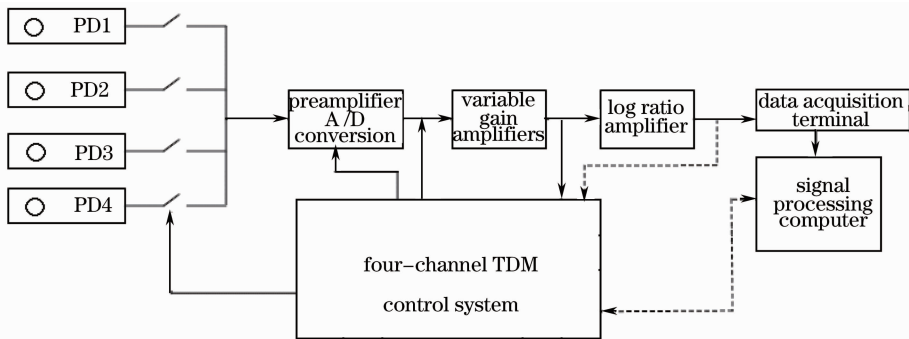


图 4 基于四通道时分复用技术的偏振检测信号处理示意图

Fig. 4 Signal process diagram of the four-channel TDM atmospheric polarization measurement technique

3 实验与讨论

根据所提出的 2 组四通道时分复用大气偏振图景检测技术,研制了一套天空偏振图景检测实验装置。该装置以第一组第一个偏振探测器(S_1)的检偏方向为系统偏振标定方向,其他各个偏振探测器的检偏方向根据该方向进行统一标定。实验前,先将该实验装置放于测量平台上,应用水准仪对该平台进行水平调校,使装置姿态为水平方向。在此基础上,通过该装置连续测量大气偏振信号,获得天空偏振分布图景。

在某一晴天转有云条件下,经过检偏器后由光电二极管所检测的光强信号如图 5 所示。表明从上午到下午,各检偏单元所检测的光强信号变化范围

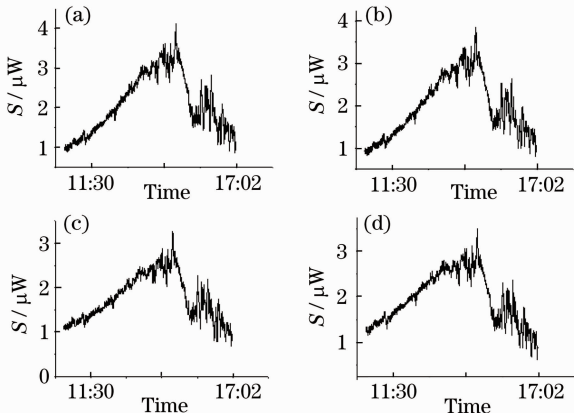


图 5 某个时段内 2 组 4 个探测器的输出信号

Fig. 5 Output signals of the four detectors in two units

很大(从 750 nW 到 4.1 μ W),其变化趋势一致。对每个探测器进行信号独立检测与处理,系统得到的偏振优势方向测量角度误差如图 6 所示。其最大误差达到 1.658×10^{-2} rad,平均误差为 4.13×10^{-3} rad。采用仿生偏振检测技术,系统得到的偏振优势方向测量角度误差如图 7 所示。其最大误差只有 1.28×10^{-3} rad,平均误差为 3.5×10^{-4} rad。基于仿生技术的偏振检测系统的测量误差降低了 1 个数量级,其偏振测量精度得到了明显提高,如表 1 所示。

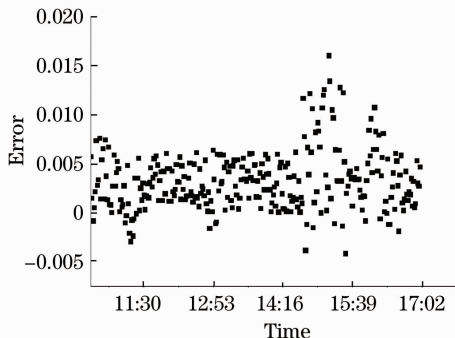


图 6 采用信号独立检测与处理技术,系统偏振角度的测量误差

Fig. 6 Measurement error of the polarization direction in independent signal detection and processing

在不同天气条件下,信号独立检测与处理系统和仿生偏振检测系统的测量结果对比如表 2 所示。仿生偏振检测系统的偏振角度测量误差均值大幅度地小于信号独立检测与处理系统的测量误差均值。

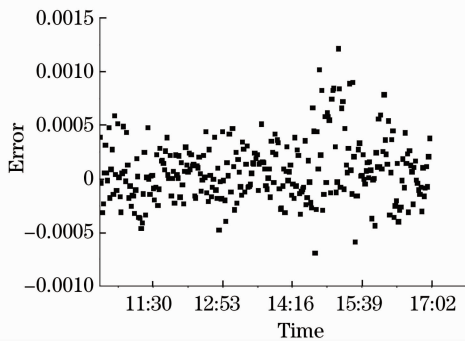


图 7 采用仿生偏振检测技术,系统偏振角度的测量误差

Fig. 7 Measurement error of the polarization direction in measurement technique based on vision bionics

信号独立检测与处理系统的最大误差均值出现在多云 1 条件下,其值为 5.73×10^{-3} rad;最小误差出现在晴天 1 条件下,其值为 4.13×10^{-3} rad。相同天气条件下,仿生偏振检测系统的偏振角度误差均值为 7.1×10^{-4} rad 与 3.5×10^{-4} rad。其测量误差分别降低了 8.07 与 11.8 倍。基于仿生技术的大气偏振检测系统明显降低了偏振角度测量误差,提高了大气偏振优势方向检测精度。该系统的测量精度能够满足载体定位对太阳、月亮等天体的位置测量要求^[7]。

表 1 晴天转有云天气条件下,不同检测系统偏振角度测量误差对比

Table 1 Measurement error of the polarization direction in the independent signal detection and processing system (ISDPS) and the four-channel TDM atmospheric polarization measurement system(FTAPMS) under partly cloudy weather

Error	ISDPS / 10^{-3} rad	FTAPMS / 10^{-3} rad	ISDPS / FTAPMS
Maximum error	16.58	1.28	12.95
Average error	4.13	0.35	11.8

表 2 不同天气条件下,不同检测系统的偏振角度测量误差均值对比

Table 2 Measurement error of the polarization direction in the ISDPS and the FTAPMS under different weather conditions

Weather	ISDPS / 10^{-3} rad	FTAPMS / 10^{-3} rad	ISDPS / FTAPMS
Sunny 1	4.13	0.35	11.8
Sunny 2	4.36	0.42	10.6
Partly cloudy 1	5.13	0.51	10.1
Partly cloudy 2	4.57	0.55	8.31
Cloudy 1	5.73	0.71	8.07
Cloudy 2	5.35	0.64	8.35

4 结 论

介绍了蜜蜂、蚂蚁和蟋蟀等昆虫的高精度偏振检测原理。基于该昆虫视觉仿生原理,提出了一种四通道时分复用大气偏振检测技术。该技术采用 4 个检测通道即可测量得到大气偏振图景,简化了现有系统;采用时分复用技术实现大气偏振信号检测,有效减少了通道信号增益差异与大气光强变化对不同通道信号的影响。通过对信号独立检测与处理系统和仿生偏振检测系统进行实验对比,验证了基于视觉仿生原理的四通道时分复用偏振检测技术能够明显降低大气偏振角度测量误差,提高大气偏振图景测量精度。基于该技术的检测系统能够获得定位级的星体位置信息,实现载体的自主导航定位。

参 考 文 献

- 1 D. Lambrinos, R. Möller, T. Labhart *et al.*. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, **30**(1-2): 39~64
- 2 T. Labhart, E. P. Meyer. Neural mechanisms in insect navigation: polarization compass and odometer [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2002, **12**(6): 707~714
- 3 U. Homberg. In search of the sky compass in the insect brain [J]. *Naturwissenschaften*, 2004, **91**(5):199~208
- 4 D. L. Hofeldt. Full-field measurements of particle size distributions: polarization ratio method[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(36): 7551~7558
- 5 R. Hegedüs, S. Åkesson, G. Horváth. Polarization patterns of thick clouds: overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(8): 2347~2356
- 6 Liu Yi, Voss Kenneth. Polarized radian distribution measurement of skylight. II. experiment and data [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(33): 8753~8764
- 7 Shen Changzhi, Sun Guoyuan. *Celestial Navigation* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987. 5~32
- 8 沈长治, 孙国元. *天文导航* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987. 5~32
- 9 Kuo-Nan Liou. *An Introduction to Atmospheric Radiation* [M]. California: Academic Press, 1980. 9~33
- 10 H. C. Van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Dover, 1981. 40~57
- 11 Bence Suhai, Gábor Horváth. How well does the Rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? a full-sky polarimetric study[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(9): 1668~1680
- 12 Gábor Horváth, András Barta, József Gál *et al.*. Ground-based full-sky imaging polarimetry of rapidly changing skies and its use for polarimetric cloud detection[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(3): 543~560
- 13 M. Mujat, A. Dogariu. Real-time measurement of the polarization transfer function[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(1): 34~45
- 14 Miriam Lehrer. *Orientation and Communication in Arthropods* [M]. Basel: Birkhäuser, 1997. 145~185
- 15 Sun Xiaobing, Hong Jin, Qiao Yanli. Investigation of measurements of polarized properties of atmospheric scattering radiation[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(1): 111~115
- 16 孙晓兵, 洪津, 乔延利. 大气散射辐射偏振特性测量研究[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(1): 111~115
- 17 Thomas Labhart. Polarization-opponent interneurons in the insect visual system[J]. *Nature*, 1988, **331**(6155): 435~437