

家蝇飞行轨迹的三维重现的一种方法

孙其坚 王 翔 张少吾

(中国科学院生物物理研究所, 北京)

夏季常可看到家蝇互相追逐。这种追逐有时候要持续 1、2 秒钟, 甚至更长的时间。有时候还会看到一只蝇捕获另一只蝇, 然后双双就近着陆的情景。从它们这种灵活多变的飞行轨迹推测, 蝇具有快速准确的飞行控制系统, 因此可以在很短的时间内测出被追逐蝇的方位和速度, 并迅速做出自己的反应。

为了研究家蝇追逐行为, 首先要对一段飞行轨迹做出定量的描述。家蝇在飞行中, 除了三个平移自由度外, 还有三个旋转自由度以及头部相对于躯体的扭动。因此严格地说起来, 描述家蝇的飞行运动是比较困难的。为使问题简化, 可以假定蝇为一个质点, 然后对这个质点的运动轨迹进行描述。以下介绍了我们的三维重现方法及其应用实例。

方 法

家蝇 (*Musca domestica*) 取自动物研究所,

7—14 日龄。实验前一天放入实验箱中使其适应环境。室温在 25℃ 左右。实验箱用有机玻

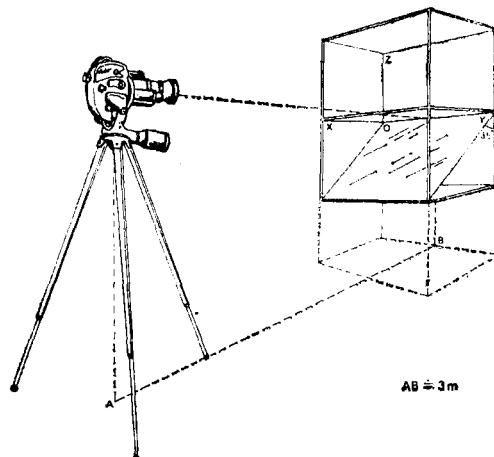


图 1 实验装置图

家蝇放在拍摄箱中, 自由飞行。光源从两侧均匀照明, 下边是一块与箱底成 45° 夹角的反射镜。图中 X 表示深度, Y 表示宽度, Z 表示高度。摄影机摆在箱子前面 3 米左右, 对焦到箱子后平面, 摄影速度为 64 张/秒。

OPA/ME 试剂反应时的 pH 值。

OPA 与氨基酸的最适反应 pH 约为 9^[6], 而离子交换柱采用分步洗脱, 首先使用的是低 pH 的洗脱液。柱流出液需要较多的 OPA/ME 硼酸缓冲液中和并达到或接近 pH 9。流速稍大, 对首先出现的几个峰无疑是有利的。

要使日立 835-50 型氨基酸分析仪与荧光检测联用并成为一种常规的方法, 某些方面尚需作进一步地改进, 但从本文的结果可见, 这个方法是可行的。

参 考 文 献

[1] Spackman, D. H., et al.: *Anal. Biochem.*, 30,

1190—1205, 1958.

- [2] Needleman, S. B., et al.: *Protein sequence determination*, 205—231, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1975.
- [3] [美国]哈罗德·盖纳编(邹冈等译):《神经肽》, 科学出版社 7—24, 1980。
- [4] Stein, S., et al.: *Arch. Biochem. Biophys.*, 155, 203—212, 1973.
- [5] Weigle, M., et al.: *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 50, 352—356, 1973.
- [6] Burbach, J. P. H. et al.: *J. Chromatog.*, 237, 339—343, 1982.
- [7] Fernstrom, M. H., et al.: *Life Sci.*, 29, 2119—2130, 1981.

〔本文于 1985 年 7 月 10 日收到〕

璃制成，大小为 $600 \times 600 \times 900$ mm。为获得深度信息，箱下放置一块与箱底成 45° 夹角的反射镜。蝇的飞行轨迹用一台摄影机 (Beau-lieu) 记录。全部装置如图 1 所示。在拍摄中，摄影机对焦到箱子的 OYZ 平面，以后平面底边的中点为坐标原点。 X 表示深度，由远至近指向摄影机方向； Y 表示宽度，从左向右； Z 表示高度。从照片上可以同时记录到蝇在 YZ 平面上的坐标以及通过镜面反射的蝇在 XY 平面上的坐标。

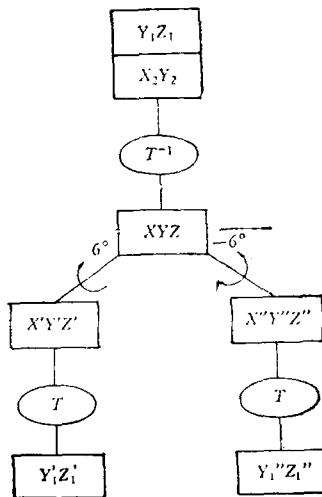


图 2 程序框图

图中 Y_1Z_1 和 Y_2X_2 是从摄影底片上输入到计算机的坐标数值， T^{-1} 是从两组平面坐标 Y_1Z_1 和 Y_2X_2 到空间坐标 XYZ 的反变换， T 则是把三维坐标向平面投影的变换。最后由 $Y'_1Z'_1$ 和 $Y''_1Z''_1$ 一起组成立体图对。向右 \rightarrow 为进一步定量分析。

图 2 是进行三维重现的程序框图。首先由投影仪读出蝇的位置坐标，假定在记录底片中上半图的坐标为 Y_1 和 Z_1 ，下半图的坐标为 X_2 和 Y_2 ，由几何光学物像关系可以得到下列方程组：

$$Y_1/V = Y/(m + d - X) \quad (1)$$

$$Z_1/V = Z/(m + d - X) \quad (2)$$

$$Y_2/V = Y/(m + d + Z) \quad (3)$$

$$X_2/V = X/(m + d + Z) \quad (4)$$

其中 V 为节点到像平面的距离， m 为节点到箱前平面的距离， d 为箱子的深度（此处 $d = 600$ mm）， V 和 m 可以通过测量和计算求出。

按上述方程组求解，就可以求得实际的空间坐标 X 、 Y 、 Z ：

$$X = X \cdot (m + d + Z)/V \quad (5)$$

$$Y = Y_1(m + d - X)/V \quad (6)$$

$$Z = (m + d)(VZ_1 - Z_1X_2)/(V^2 + Z_1X_2) \quad (7)$$

我们把从三维空间 XYZ 到 Y_1Z_1 和 Y_2X_2 的映象记为变换 T ，而 Y_1Z_1 和 Y_2X_2 到 XYZ 的映象记为反变换 T^{-1} 。

然后由实际的 XYZ 坐标，经过分别绕 Z 轴逆时针、顺时针各旋转 6° ，得旋转后的坐标 $X'Y'Z'$ 和 $X''Y''Z''$ ：

$$X' = X \cos(6^\circ) + Y \cos(180^\circ - 6^\circ) \quad (8)$$

$$Y' = X \cos(180^\circ + 6^\circ) + Y \cos(6^\circ) \quad (9)$$

$$Z' = Z \quad (10)$$

$$\begin{cases} X'' = X \cos(-6^\circ) \\ \quad + Y \cos(180^\circ - (-6^\circ)) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} Y'' = X \cos(180^\circ + (-6^\circ)) \\ \quad + Y \cos(-6^\circ) \end{cases} \quad (12)$$

$$Z'' = Z \quad (13)$$

最后再经过变换 T ，计算出 $Y'_1Z'_1$ 和 $Y''_1Z''_1$ ：

$$Y'_1 = VY'/ (m + d - X') \quad (14)$$

$$Z'_1 = VZ'/ (m + d - X') \quad (15)$$

$$Y''_1 = VY''/ (m + d - X'') \quad (16)$$

$$Z''_1 = VZ''/ (m + d - X'') \quad (17)$$

组成 YZ 平面的立体图对。

另一方面，如图所示，蝇的飞行轨迹 $\{x_i, y_i, z_i\} i = 1, 2, \dots, n$ 亦用于对蝇的飞行控制动力学进行分析，研究蝇的追逐行为规律。

应用实例

图 3 是实际拍到的一段雄蝇追逐雌蝇的飞行轨迹。其中图 3a 是在 YZ 平面的投影，相当于从正面拍摄，纵坐标表示高度；图 3b 是在 XY 平面的投影，相当于从底面拍摄，纵坐标表示深度。由于经过了镜面反射，成像要显得小一些。图中 0 为坐标原点。雄蝇追逐雌蝇，从左向右飞行。

图 4 是经过计算修正的结果，由此已经可

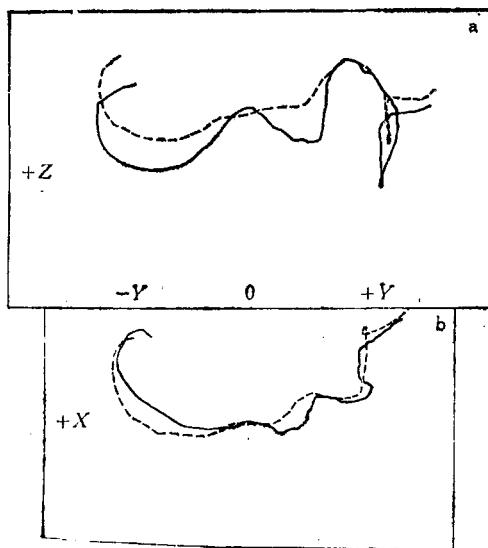


图 3 拍摄的飞行轨迹

a YZ 平面上的投影图 b XY 平面上的投影图(由于经过了镜面反射,成像要显得小一些) —— 雄蝇的飞行轨迹
----- 雌蝇的飞行轨迹 图中 0 为坐标原点。雄蝇追逐雌蝇,从左向右飞行。整个追逐过程历时 1 秒钟左右。

以初步地看到一些规律。首先,我们看到在追逐过程中(图 4b),雄蝇经常是在雌蝇的后下方飞行,用复眼的背前区部分注视着目标(雌蝇)。一般认为,这可能是使目标处在蓝天的背景中,以便于分辨的缘故。其次,由图 4a 可见,雄蝇在水平方位上面总是争取和雌蝇保持一致,换句话说,雄蝇在追逐过程中,总是力图把水平误差角减小到零,这和从图 4b 中看到的规律有所

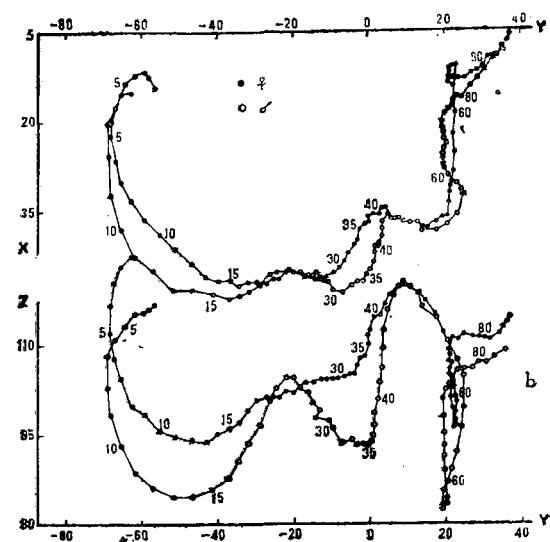


图 4 计算机修正后的飞行轨迹

a 蝇在 XY 平面上追逐的轨迹; b 蝇在 YZ 平面上追逐的轨迹。图中小空心圆的位置为带头的目标雌蝇的瞬时位置,小实心圆的位置为追逐雄蝇的瞬时位置。图中轨迹曲线上的数字为两蝇瞬时位置的序号,每相邻两个瞬时位置的时间间隔 $\Delta t = 15.6$ 毫秒。坐标数字均为相对值。

不同。从图 4 修正后的空间坐标,可以进一步计算出追逐蝇输入、输出的定量关系,详细的分析结果,参见《家蝇追逐行为》一文^[1]。

在分析中,除了进行定量的计算外,有时候还需要对家蝇的飞行轨迹有一个直观的定性了解,以便观察和比较各种追逐轨迹的特点。

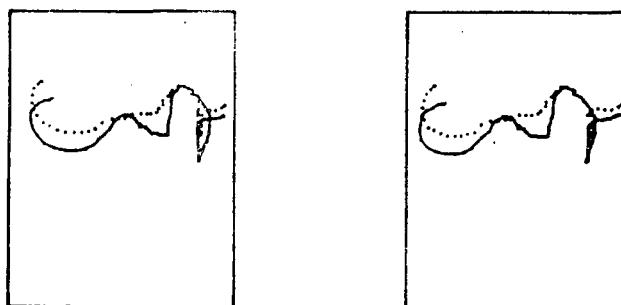


图 5 立体图对

图中的两条曲线分别表示雄蝇(——)和雌蝇(……)的飞行轨迹。左图是把 XYZ 坐标顺时针旋转 6°, 投影到 YZ 平面;右图是把 XYZ 坐标逆时针旋转 6°, 投影到 YZ 平面。

图 5 是按上述方法,把修正的坐标,逆时针和顺时针各旋转 6° 后再进行变换,投影到 YZ

平面,组成立体图对。读者不难借助一立体镜,形象地看出家蝇在追逐时的空间飞行轨迹。

讨 论

1. 我们在实验中选择了 C. Wehrhahn^[2] 等人使用的方法，通过一台摄影机同时拍摄记录 YZ 和 XY 平面的家蝇飞行轨迹，这和 J. Zeil^[3] 采用两台摄影机有所不同。我们采用一面反射镜代替了第二台摄影机。这样设备简化了，又避免了两台摄影机要保持同步的困难。但这样对景深的要求增加了；要在对焦平面前后 600mm 的深度范围内成象清晰，这需要很好的照明条件，以增加景深。另外，由于每张照片上要同时拍下 YZ 和 XY 平面的两幅画面，每张画面的尺寸相对就小了，这不利于分辨率的提高，特别是当两蝇位置非常接近时，就很难区分二者和确定蝇瞬间长轴的取向。解决的办法之一，除了刚才提到的增加景深来提高图像的清晰度外，还可以采用高速摄影，来减小快门曝光瞬间蝇飞行位移所可能引起的图像模糊，以提高分辨率。

2. 如何把一组空间坐标（例如本实验中的一段飞行轨迹）立体地再现出来？我们研究室郑竺英老师进行三维重建工作时，是直接把深度 X 加进 YZ 平面的投射图，然后组成立体图对：

$$\left. \begin{array}{l} Y' = Y + KX \\ Z' = Z \end{array} \right\} \quad \text{右} \quad \left. \begin{array}{l} Y'' = Y - KX \\ Z'' = Z \end{array} \right\}$$

由于明视距离 25—35cm，两眼间距 6.5cm， K 一般取 0.1。这种平移透视修正的方法，简单实用，通常可以取得令人满意的立体效果。

(上接第 76 页)

电极推进到预定实验区域，而后开启仪器电源，仪器自动发出信号控制微操纵器运行。由于仪器内电子开关和手动开关是并联的，所以并不影响手动操纵。

本工作得到周佳音副教授的热情支持,谨致谢意。

参考文献

- [11] Snader, W. D., and Goetz, K. L.: *Med. & Bio. Eng.*,

由于我们在实验中已经建立了平面坐标 Y_1Z_1 、 Y_2X_2 和空间坐标 X 、 Y 、 Z 之间的正反变换关系，另外在计算机上进行坐标旋转又很方便，所以我们采用坐标旋转的方法来获得立体图对，观察蝇飞行的空间轨迹。这里有两个问题需要考虑，一个是旋转角度多大合适；角度小了立体效果不好，大了又可能引起失真，根据明视距离和两眼间距的换算关系。我们计算出两张图的转角应该是 $\pm 6^\circ$ 。另一个问题是进行旋转的问题，首先要把转轴移动到飞行轨迹的中心，因为人平时用肉眼观察目标时，总是始终注视着目标，而不是让它偏在一边的。然后进行坐标旋转， $+6^\circ$ 和 -6° 分别相当于左、右眼各自观测目标时的注视角度。旋转后的两张图，经过变换 T 投影到 YZ 平面，组成立体图对。实验证明，这种旋转透视修正(利用深度信息，对 YZ 平面的坐标进行修正)的方法，具有比较理想的立体效果。

撰写本文时曾与郑竺英老师进行过有益的讨论，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 张少吾, 孙其坚, 王翔: 《生物物理学报》, 第1卷, 第4期, 1985。
 - [2] Buelthoff, H., T. Poggio, C. Wehrhahn: *Zeitschrift für Naturforschung*, V. 35c, No. 9/10, 1980.
 - [3] Zeil, J.: *Journal of Comparative Physiology A*, 150, 395—412, 1983.

[本文于 1985 年 7 月 15 日收到]

8x Company 19 23 1981

- [2] 李朝义:《生物化学与生物物理进展》, 2, 36, 1976。
 [3] 陈俊强、赵志奇:《生理学报》, 32, 87, 1980。
 [4] 戚明阳、王刚:《生理学报》, 36, 301, 1984。
 [5] Glaser, E. M. and Ruchkin, D. S.: *Principles of Neurobiological Signal Analysis*, Academic Press, New York, 62, 1976.

[本文于 1985 年 5 月 21 日收到]