

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°C 左右。实验箱用有机玻

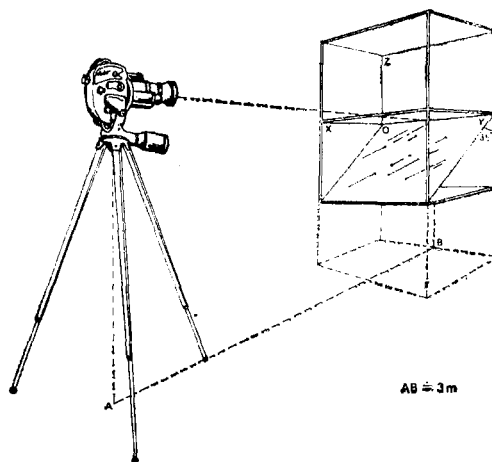


图 1 实验装置图

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 $600 \times 600 \times 900\text{mm}$ 。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 (Beaulieu) 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。

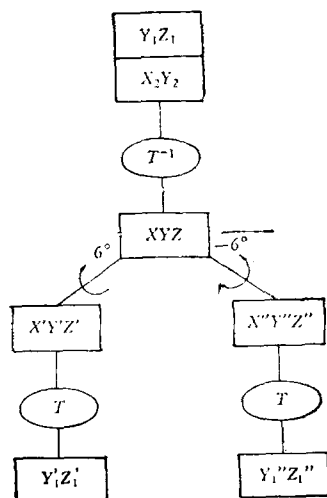


图 2 程序框图

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 是进行三维重建的程序框图。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 $d = 600\text{mm}$), 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 :

$$X = X_2(m + d + Z)/V \quad (5)$$

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

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

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 $X''Y''Z''$:

$$\begin{cases} X' = X \cos(6^\circ) + Y \cos(180^\circ - 6^\circ) \\ Y' = X \cos(180^\circ + 6^\circ) + Y \cos(6^\circ) \\ Z' = Z \end{cases} \quad (8) \quad (9) \quad (10)$$

$$\begin{cases} X'' = X \cos(-6^\circ) \\ \quad + Y \cos(180^\circ - (-6^\circ)) \\ Y'' = X \cos(180^\circ + (-6^\circ)) \\ \quad + Y \cos(-6^\circ) \\ Z'' = Z \end{cases} \quad (11) \quad (12) \quad (13)$$

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 O 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

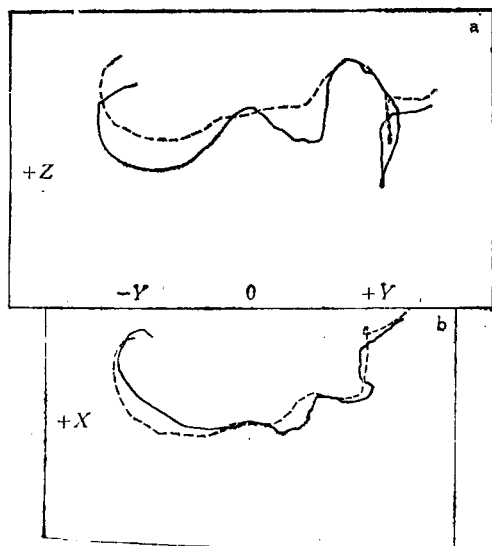


图 3 拍摄的飞行轨迹

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

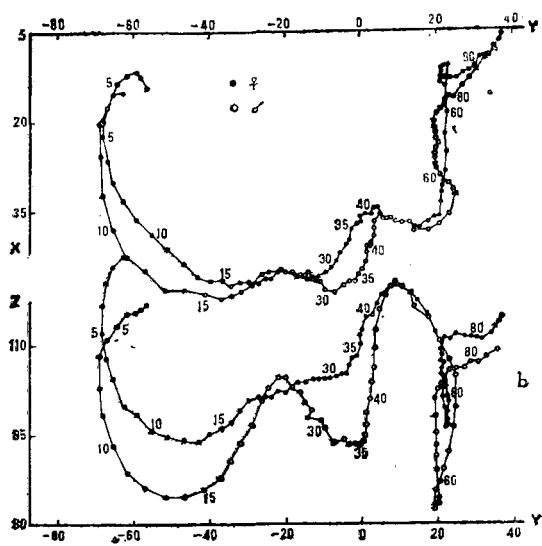


图 4 计算机修正后的飞行轨迹

a 蝇在 XY 平面中追逐的轨迹; b 蝇在 YZ 平面中追逐的轨迹。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。

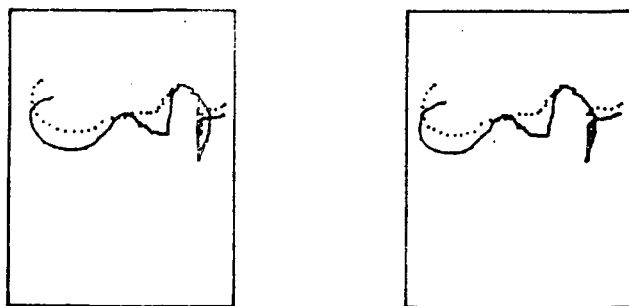


图 5 立体图对

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。

