

國立政治大學應用數學系

碩士學位論文

果蠅在不同運動模式下的存活率分析
Analysis of the Survival Rate of Drosophila in Different Movement

Patterns

指導教授：曾正男 博士

研究生：羅令宇 撰

中華民國 110 年 6 月

致謝

經歷了長時間的努力，終於完成了我的碩士論文口試。從來沒想過會以線上的形式來完成，也算是給我碩士求學生涯留下特殊難忘的回憶，這三年在政大的生活也即將劃下句點。

會想研究這個主題，首先要感謝我的指導教授—曾正男老師，剛拿到這個題目時覺得相當有挑戰性，畢竟要從無到有寫出這麼複雜的程式進行模擬，對我而言本身就是相當困難的一件事，但過程中老師也不斷地指導我，告訴我下一步該怎麼做，讓我可以有方向的去修正，最後達到還不錯的效果，也在這個研究的過程中學到做該如何做一個完整的模擬，以及分析模擬的結果，真的讓我學到很多，完成後也很有成就感。

再者要感謝 政大應數系—蔡炎龍老師 以及 國立成功大學數學系—舒宇宸老師 兩位口試委員在論文口試時提供很多日後可以接續做的研究方向，讓整個研究能夠更為完整，以及哪些部分之前研究過程沒有想到的地方，修正之後能夠做得更好。

回顧在應用數學系碩士班的這三年，從剛進來遇到最到的困難「實變函數論」，接著學會了寫程式以及到商學院修了財務工程相關課程，到最後完成論文，這三年確實學到非常多的東西，而且是不同面向的學習，包含二年級接了微積分助教，也參與過財資中心的大數據分析，是我進來碩班之前不曾想像過的。

最後要感謝我的父母支持我完成學業，讓我能學習自己熱愛的事情，沒有顧慮的完成學業。這三年也遇到很多很好的老師、學長姐、助教與同學們，不僅僅在課業上互相幫助，也創造出很多美好的回憶，是個非常美好的時光，感謝政大帶給我的一切，也感謝上帝安排我來到這，是最美好

的安排。

羅令宇 謹誌于
國立政治大學應用數學系
2021年6月



中文摘要

研究生物運動的各種行為，一直都是許多學者們熱愛研究的主題之一。許多學者想運用數學的方法去解釋與描述生物的運動特徵，而果蠅 (*Drosophila*) 因為繁衍數度快且適應力好，即使他在生活中很煩人，但也成為了許多學者喜愛的研究對象。

從過去的文獻中發現，果蠅的運動模式主要可分為「萊維飛行」與「布朗運動」，由於此兩種模式有著很明顯的差異，因此本研究想藉由此兩種運動模式的特性，去分析兩者差異對總體存活率的影響，了解在一個群體之中怎樣的比例分配下，會帶給整體果蠅群體最大的效益。

本研究使用 Python 進行果蠅運動行為的模擬，模擬十隻果蠅一起合作覓食，在這過程中也包含死亡與繁殖。我們模擬會分成十一種不同運動模式的比例分配，統計他們找尋到食物的次數、時間還有不同運動模式的死亡個數與死亡的原因。我們從數據中發現，若十隻果蠅都做相同的運動模式時，整體的死亡率是相當高的，相對地找尋食物的效率也是差的，而存活率較高的比例落在 2 : 8 與 3 : 7(萊維飛行 : 布朗運動)，但隨著萊維飛行的比例變高時，存活率則是持續下降。

關鍵字：萊維飛行、布朗運動、果蠅優化演算法。

Abstract

The study of various behaviors of biological movement has always been one of the topics that many scholars love to study. Many scholars want to use mathematical methods to explain and describe the movement characteristics of organisms. *Drosophila* reproduces several times quickly and has good adaptability. Even though it is annoying in life, it has become a favorite research object of many scholars.

It has been found from the past literature that the movement patterns of fruit flies can be mainly divided into 「Lévy flight」 and 「Brownian motion」. Since these two patterns have obvious differences, this study intends to use these two movement patterns characteristics, to analyze the impact of the difference between the two on the overall survival rate, and understand what proportion of a group will bring the greatest benefit to the overall fruit fly population.

This study uses Python to simulate the movement behavior of fruit flies, simulating ten fruit flies cooperating for food, and this process also includes death and reproduction. Our simulation will be divided into the proportional distribution of six different movement patterns, and count the number of times and time they find food, as well as the number of deaths and the cause of death in different movement patterns. We found from the data that if ten fruit flies all do the same movement patterns, the overall mortality rate is quite high, and the relative efficiency of finding food is also poor, and the higher survival rate falls at 2 : 8 and 3 : 7. (Lévy flight :

Brownian motion), but as the proportion of Lévy flight becomes higher, the survival rate continues to decline.

Keywords: Lévy flight、Brownian motion、Fruit Fly Optimization Algorithm。



目錄

致謝.....	ii
中文摘要.....	iv
Abstract.....	v
目錄.....	vii
表目錄.....	ix
圖目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
第一節 研究背景.....	1
第二節 研究動機與目的.....	2
第三節 文章架構.....	2
第二章 文獻探討.....	3
第一節 果蠅最佳化演算法.....	3
第二節 布朗運動.....	6
第三節 萊維飛行.....	7
第三章 研究方法.....	8
第一節 兩種運動模式的果蠅飛行模擬.....	9
第二節 增加食物氣味與障礙物模擬.....	11
第三節 果蠅群體飛行模擬.....	14
第四節 包含繁衍與死亡綜合模擬.....	16
第四章 研究結果.....	17
第一節 參數設置.....	17
第二節 氣味分布圖.....	19
第三節 實際模擬結果.....	23
第五章 結論.....	69

附錄 A python code.....	70
參考文獻.....	86



表目錄

表 3.1.1 三至十群共變異數平均	10
表 4.3.1 模擬六十次十隻都做「萊維飛行」的結果	23
表 4.3.2 模擬六十次九隻做「萊維飛行」、一隻做「布朗運動」的結果	27
表 4.3.3 模擬六十次八隻做「萊維飛行」、兩隻做「布朗運動」的結果	31
表 4.3.4 模擬六十次七隻做「萊維飛行」、三隻做「布朗運動」的結果	35
表 4.3.5 模擬六十次六隻做「萊維飛行」、四隻做「布朗運動」的結果	39
表 4.3.6 模擬六十次五隻做「萊維飛行」、五隻做「布朗運動」的結果	43
表 4.3.7 模擬六十次四隻做「萊維飛行」、六隻做「布朗運動」的結果	47
表 4.3.8 模擬六十次三隻做「萊維飛行」、七隻做「布朗運動」的結果	51
表 4.3.9 模擬六十次二隻做「萊維飛行」、八隻做「布朗運動」的結果	55
表 4.3.10 模擬六十次一隻做「萊維飛行」、九隻做「布朗運動」的結果	59
表 4.3.11 模擬六十次十隻都做「布朗運動」的結果	63
表 4.3.12 各項數據統整一	67
表 4.3.13 各項數據統整二	68

圖目錄

圖 2.1.1 果蠅最佳化演算法流程圖	4
圖 2.2.2 1000 步布朗運動模擬	6
圖 2.3.3 1000 步萊維飛行模擬	7
圖 3.1.1 兩種運動模式各模擬 1000 步結果	9
圖 3.2.2 食物氣味分布圖	11
圖 3.2.3 氣味引導下兩種運動模式各模擬 1000 步結果	12
圖 3.2.4 有障礙物時食物氣味分布圖	12
圖 3.2.5 有障礙物時氣味引導下兩種運動模式各模擬 5000 步結果	13
圖 3.3.6 十隻果蠅群體覓食模擬	14
圖 3.4.7 十隻果蠅群體綜合模擬	16
圖 4.1.1 實驗環境圖	18
圖 4.2.2 食物一氣味粒子分布圖	19
圖 4.2.3 食物一粒子分布熱像圖	19
圖 4.2.4 食物二氣味粒子分布圖	20
圖 4.2.5 食物二粒子分布熱像圖	20
圖 4.2.6 食物三氣味粒子分布圖	21
圖 4.2.7 食物三粒子分布熱像圖	21
圖 4.2.8 食物四氣味粒子分布圖	22
圖 4.2.9 食物四粒子分布熱像圖	22

第一章 緒論

第一節 研究背景

果蠅 (*Drosophila*) 是生活中常見的飛行生物，尤其是常常出現在家中有食物的地方飛來飛去，數量多又難以捕捉，造成許多人生活上的困擾，揮之不去非常討厭。而果蠅這麼難捕捉的原因，除了因為牠的體型很小以外，還有著如閃電般迅速又難以預測的飛行軌跡，讓我們無法掌握牠的飛行路線，將牠擊落。而且牠不僅能迅速地閃避危險及障礙物，還可以長距離的飛行來尋找食物，即便是高樓層的住戶也難逃被果蠅大軍侵門踏戶。因此，其特殊的飛行方式也成為眾多學者研究的目標。

1986 年 Shlesinger 和 Klafter 最早提出某些生物運動模式的特徵與「萊維飛行」(Lévy flight) 有關 [9]，「萊維飛行」一詞於 1982 年由美國數學家 Benoît Mandelbrot 在其著作 *The Fractal Geometry of Nature* 中所提出，是以法國數學家 Paul Pierre Lévy 的名字來命名。「萊維飛行」是一個變數服從萊維分布 (Lévy distribution) 的隨機過程，而萊維分布是一個重尾分布 (Heavy-tailed distribution)，此種分布出現較大值的機率比常態分布高出的多，因此「萊維飛行」與「布朗運動」(Brownian motion) 相比起來，在長時間的運動過程後，前者的移動距離會比較長很多。在這之後也有許多研究顯示「萊維飛行」是許多動物的運動模式。1999 年 Viswanathan GM 等人透過分析昆蟲、哺乳動物和鳥類等生物的覓食實驗數據，當生物所尋覓的目標是稀疏且可重複造訪時，發現其搜索的最佳策略與「萊維飛行」理論是一致的 [11]。到了 2007 年 Reynolds AM 和 Frye MA 的研究結果中也顯示果蠅在自由飛行時的飛行模式是呈現「萊維飛行」[8]。之後也有許多研究持續在討論在不同環境條件的情況下，生物的運動模式會在「萊維飛行」與「布朗運動」之間切換，找尋對他們覓食或躲避追捕時最有利的運動策略 [6] [10]。以上的相關研究多著重在驗證生物運動的最佳搜尋策略，進而衍生出相關仿生優化演算法，來解決一些大規模複雜的優化問題。例如在 2011 年，台灣學者潘文超先生在研究果蠅搜尋食物的行為，利用果蠅群體覓食時善用嗅覺與視覺以及團隊合作的模式，發展出

「果蠅最佳化演算法」(Fruit Fly Optimization Algorithm) [5]，由於其結構簡單易操作，日後也在各領域被廣泛的研究與討論。2017 年廣西民族大學郭德龍等人引入果蠅的飛行軌跡「萊維飛行」來改進「果蠅最佳化演算法」，讓此演算法搜索能力與精確度有大幅度的提升 [3]。

第二節 研究動機與目的

從過去的研究中發現，果蠅在覓食時的飛行過程，依據移動的步長主要分為兩種運動模式，一種是步長滿足一個重尾的穩定分布，其特性是短距離的遊走搭配上偶爾長距離的移動，我們稱之為「萊維飛行」[7]；另一種為步長滿足常態分配的隨機過程，又稱「布朗運動」。此兩種飛行模式在搜尋食物的效率以及移動的距離上在不同的環境條件下會有著明顯的差異。另外果蠅的覓食是採取群體行動，利用團隊合作的方式，以及善用嗅覺與視覺，讓群體在覓食時能夠有效率的找尋食物，這就是為什麼果蠅可以快速地出現在家中有食物的地方，讓人討厭又對牠們沒有辦法的原因。既然同時存在兩種不同運動模式，也就代表著果蠅群體中每隻果蠅的運動模式是不會相同的，既然如此，不同的運動模式是否會影響果蠅群體的存活率，在過去的相關研究中是沒有專門探討此主題的。因此本研究的研究目的為探討當果蠅群體在覓食時，果蠅的數量、食物的數量和不同的險惡條件下，找尋群體中採取「萊維飛行」和「布朗運動」這兩種不同運動模式的果蠅數量比例，利用兩種運動模式不同的特性，分析是否影響果蠅群體的整體存活率，我希望透過 Python 模擬果蠅群體的覓食行為，找出最佳的存活率以及其影響整體存活率背後的原因。

第三節 文章架構

本文章一共分為五個章節，第一章為緒論，包含研究背景、研究動機與目的和文章架構。第二章為文獻探討，主要介紹果蠅群體的覓食行為以及相關理論基礎，包含「果蠅最佳化演算法」、「布朗運動」與「萊維飛行」。第三章為研究方法，此章節會介紹本研究的假設以及詳細說明模擬實驗室如何建置。第四章為研究結果。第五章為結論。

第二章 文獻探討

我們要使用電腦程式模擬果蠅的行為，首先了解果蠅在覓食過程中果蠅群體是如何相互分工合作的，在《果蠅最佳化演算法》書中可以發現，裡面詳細描述了果蠅群體在覓食時的合作模式，以及如何在程式中進行模擬。接著了解果蠅的運動行為「布朗運動」與「萊維飛行」的理論與算法。

第一節 果蠅最佳化演算法

2011 年潘文超先生從果蠅的覓食行為得到了啟發，因此提出果蠅優化演算法。在書中針對果蠅群體的覓食行為提出了以下觀點。果蠅在尋覓食物時會集體行動，且利用嗅覺與視覺來搜尋。果蠅首先會隨機距離與方向的往四處飛行，接著每隻果蠅會依照氣味的濃度來判斷所在位置是否接近食物，當某隻果蠅判斷自己處在位置濃度為最佳濃度時，就會傳送訊息給其他果蠅，接收到訊息的果蠅們則會利用視覺飛向發送訊息的位置與其他同伴聚集，聚集後就會繼續的隨機飛行，重複以上動作，直到找到食物為止。

以下是果蠅群體覓食的步驟流程圖：

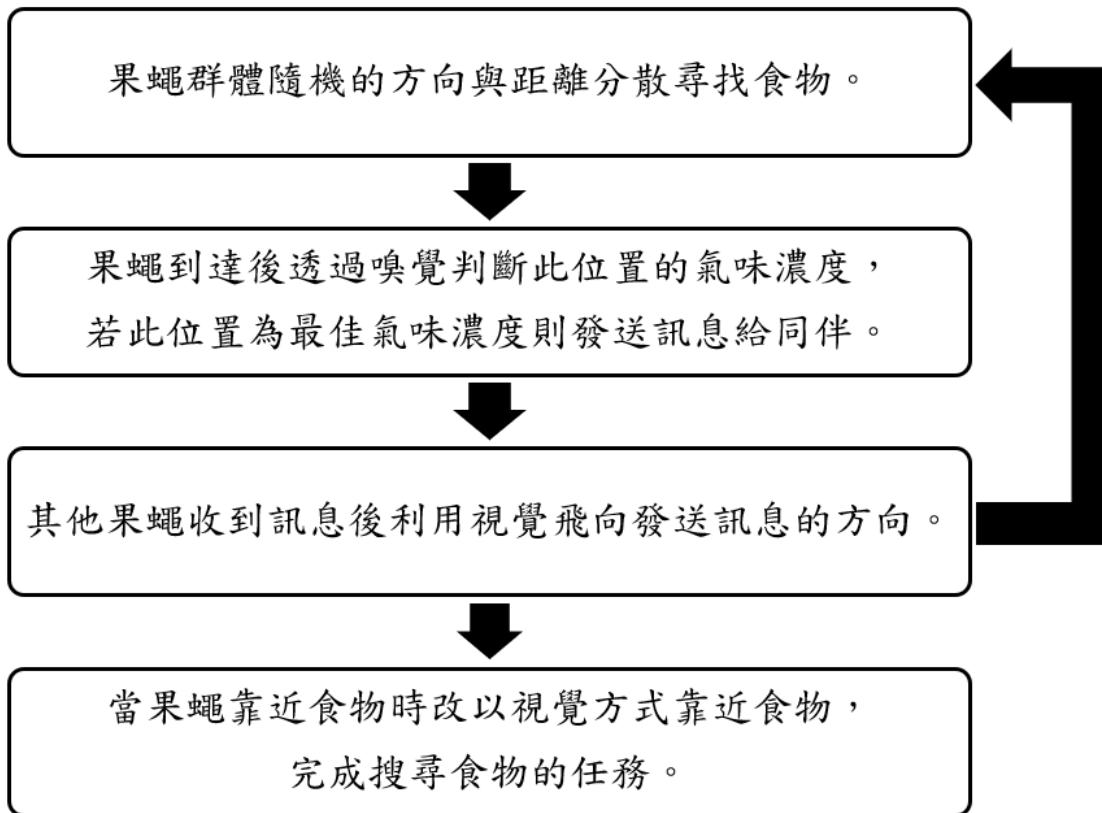


圖 2.1.1 果蠅最佳化演算法流程圖

因此我們可以透過程式來實現果蠅群體的覓食行為，以下我們分為 6 個步驟：

1. 首先初始化果蠅群體出發的位置 (X_0, Y_0)

2. 果蠅群體給定隨機的方向與距離：

(α 、 β 代表隨機數)

$$X_i = X_{i-1} + \alpha$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \beta$$

3. 透過嗅覺判斷此位置的氣味濃度，選出最佳氣味濃度 T_i ：

(S_i 表示第 i 個點的氣味濃度)

$$T_i = \text{Max}(S_i)$$

4. 比較最佳氣味濃度 T_i 與前次保留的最佳濃度 BS (初始值為 0)，若 T_i 較大則發送訊息給其他果蠅，且保留最佳氣味濃度。若 T_i 較小則重複 (2)~(4)：

if $T_i > BS$:

$$BS = T_i$$

5. 其他果蠅收到訊息後利用視覺飛向發送訊息的方向：

(I 表示最佳氣味濃度 (BS) 所在點的 index)

$$X_i = X_I$$

$$Y_i = Y_I$$

6. 重複 (2)~(5) 直到靠近食物範圍內為止。

本次研究也是仿照以上步驟加以改良後進行模擬。

第二節 布朗運動

布朗運動 (Brownian motion) 又稱 Wiener 過程。1827 年英國植物學家 Robert Brown(1773-1858) 利用顯微鏡觀察懸浮於溶液中的微小粒子，會呈現不規則狀的運動，稱之為布朗運動。之後愛因斯坦 (Einstein) 於 1905 年利用物理中分子動力學的原理以數學的形式來描述布朗運動。之後也成為了應用機率中最重要的過程之一。^[4] 本研究會使用到二維空間中的布朗運動，討論單一粒子 (果蠅) 做二維布朗運動時移動的軌跡特性。而二維布朗運動就是其各維度各自獨立且滿足一維布朗運動。所以首先介紹一維布朗運動 $(X_t)_{(t \geq 0)}$ ，是一個關於時間的隨機過程，其變數服從常態分佈，其定義是滿足以下幾點：

1. $X(0) = 0$ 且 $X(t)$ 在 $t = 0$ 連續
2. $(X_t)_{(t \geq 0)}$ 有定常增量與獨立增量
3. 對 $\forall t > 0$ ， $X(t)$ 有 $N(\mu t, \sigma^2 t)$ 之分布，其中 μ, σ 為常數。當 $\mu = 0, \sigma = 1$ 時，則此過程稱為標準布朗運動。

由此可知，我們模擬果蠅做布朗運動時，飛行的步長就會服從常態分布。因此我們要模擬果蠅做二維布朗運動，就可使用以下方法：

$$X_i = X_{i-1} + \alpha$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \beta$$

其中 $\alpha, \beta \sim N(\mu, \sigma^2)$ 以下是使用 Python 模擬二維布朗運動 1000 步的運動軌跡：

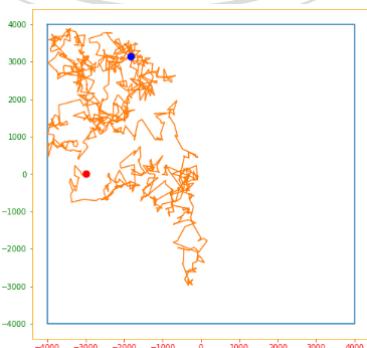


圖 2.2.2 1000 步布朗運動模擬

第三節 萊維飛行

自從 1930 年代法國數學家 Paul Lévy 於提出萊維分布 (Lévy distribution) 之後，很多學者開始對其進行研究。到 1982 年「萊維飛行」這個名詞被美國數學家 Benoît Mandelbrot 在他的著作中所提出，「萊維飛行」是一個變數服從萊維分布的隨機過程，其中萊維分布屬於重尾分布 (Heavy-tailed distribution)，其飛行的特性為大量短距離移動搭配上偶爾較長距離的移動，在探索大規模的未知空間時，會比布朗運動來得更有效率。二維的萊維飛行在生成時，分為步長與方向兩個變數。方向的部分是以均勻分布的隨機數來生成，而步長的部分則是以服從萊維分布的隨機數來生成。比較困難的地方就在於生成萊維分布的隨機數，很少有方法可以做到，而大多使用的是 Mantegna 算法來進行模擬，其算法如下：

$$S = \frac{\mu^{\frac{1}{\beta}}}{|\nu|^{\frac{1}{\beta}}}$$

S 為步長，其中 $\mu \sim N(0, \sigma_\mu^2)$ 、 $\nu \sim N(0, \sigma_\nu^2)$ 且 $\sigma_\mu = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \sin \frac{\pi\beta}{2}}{\Gamma[\frac{1+\beta}{2}] \beta \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right)^{\frac{1}{\beta}}$ 。

而從研究發現，當 $\sigma_\nu = 1$ ， $\beta = 1.5$ 時，萊維飛行在搜索未知空間時的效率是最大的。

以下是使用 Python 模擬二維萊維分布 1000 步的運動軌跡：

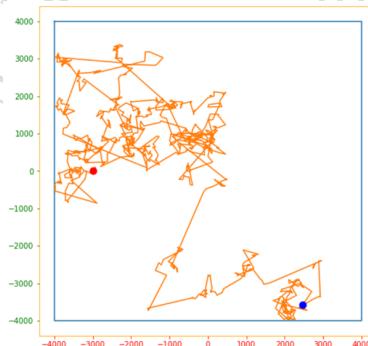


圖 2.3.3 1000 步萊維飛行模擬

第三章 研究方法

此章節會依序介紹如何利用 Python 來模擬果蠅覓食的過程。第一節會分別模擬果蠅的兩種飛行軌跡，以圖像方式呈現模擬結果與比較其差異性，並且以統計的方法驗證我們的假設正確。第二節開始我們會加入氣味粒子的引導以及障礙物的干擾，來增加果蠅在覓食過程中的複雜度，果蠅可藉由依靠嗅覺來尋找食物但同時也必須要閃避障礙物來尋找食物。由於果蠅在覓食時屬於相互合作集體覓食，所以在第三節中會增加果蠅的數量，模擬果蠅群體的覓食行為。在最後一節我們會加入果蠅的繁殖與死亡，讓模擬更貼近現實狀態，進而來計算果蠅群體的總體存活率。



第一節 兩種運動模式的果蠅飛行模擬

首先必須設置模擬環境，果蠅活動的範圍設在 $[-4000, 4000] \times [-4000, 4000]$ ，以 $(0, 0)$ 為果蠅群體出發的起始點。我們分別模擬「萊維飛行」(圖 3.1.1(a)) 與「布朗運動」(圖 3.1.1(b)) 飛行 1000 步的情況，以圖像的方式呈現模擬結果，圖片中紅點為果蠅出發的起始點，藍點為果蠅飛行 1000 步後所在的位置，黑色線條則是果蠅的飛行軌跡。

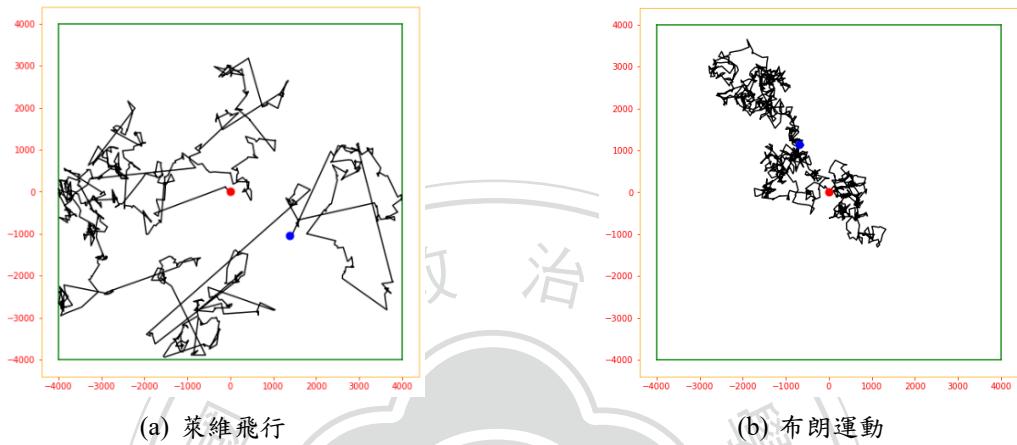


圖 3.1.1 兩種運動模式各模擬 1000 步結果

我們從圖上可觀察兩者特性的差異，首先此次「萊維飛行」模擬的步長平均為 175 單位，其中存在著許多大距離的移動，位置的分布也比較分散；而此次「布朗運動」模擬的步長平均為 125 單位，圖中顯示的則幾乎全是屬於小距離的移動。因此我們以兩張圖的結果來看有以下推測，「萊維飛行」的搜索範圍是比「布朗運動」要大很多的，範圍大也就意味著在相同步數下，果蠅找尋食物的效率是比較高的。而為了證明我們的推測是否正確，以下我們分別模擬兩種運動模式各 1000 次，然後將每次模擬中，每個位置的座標進行分群，找出每個小群的重心座標，藉由此重心座標去判斷群與群之間的離散程度。若「萊維飛行」的離散程度較大，也就證明了我們的推測是正確的。我們使用 K-Means 演算法進行分群，將每次模擬的點各自分為三至十群，再分別計算各群體的共變異數 (Covariance) 後取絕對值加總，作為離散程度的指標，在經過兩種運動模式各 1000 次的模擬之後，得到的結果為：

表 3.1.1 三至十群共變異數平均

分群數	萊維飛行	布朗運動
3	134882	66258
4	81448	44013
5	65475	35103
6	54479	25152
7	43472	21007
8	34609	17741
9	32374	15083
10	28413	12853

從表格中可發現，不管是將點分為幾群，「萊維飛行」的平均共變異數都是大於「布朗運動」的平均共變異數，前者平均約為後者的兩倍，兩者有著顯著的差異。因此我們可以得知「萊維飛行」的搜索範圍確實比「布朗運動」要大很多的。

第二節 增加食物氣味與障礙物模擬

在此章節我們加入食物的氣味粒子，目的是有幫助果蠅在搜尋食物的過程中可以利用嗅覺判斷食物氣味粒子的濃度，了解當下位置與食物距離的遠近，引導果蠅們往正確的方向飛行。首先與上一節設置一樣的模擬環境，果蠅活動的範圍 $[-4000, 4000] \times [-4000, 4000]$ ，食物則放置在座標 $(3000, 0)$ ，氣味粒子會從食物位置以布朗運動向外擴散(圖 3.2.2(a))，圖中藍色點表示所有氣味粒子的位置。由於果蠅在每一次判斷粒子濃度時，都需要耗費大量的計算量，因此我們必須先計算好每個位置的濃度，來降低模擬所需要的時間。為此我們將果蠅的活動範圍以 500 為單位劃分為 16×16 個格子點，去統計每個格子點裡的粒子數作為每個位置的氣味濃度(圖 3.2.2(b))。

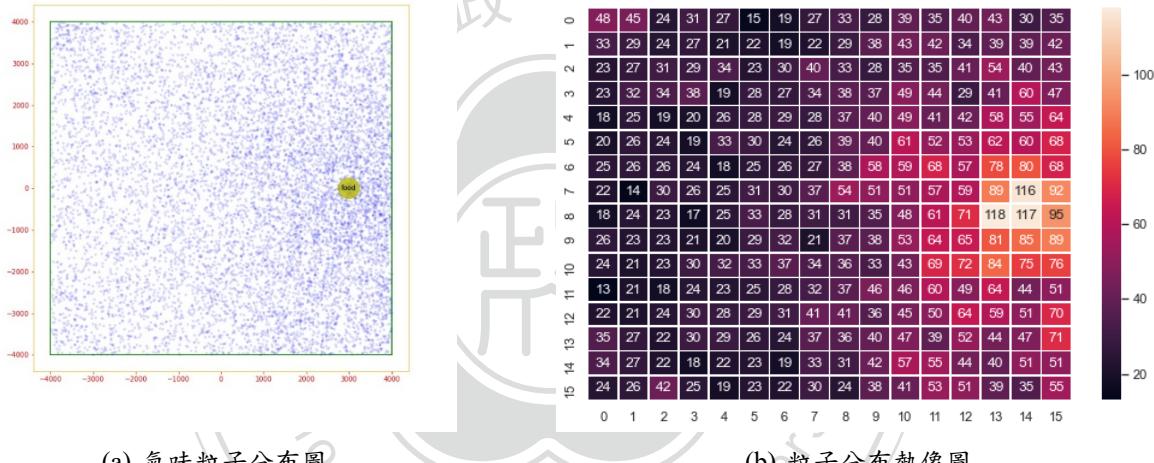
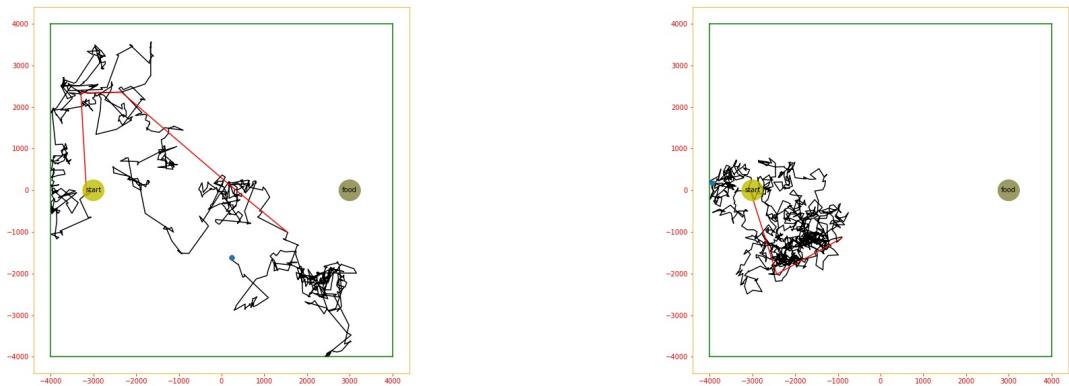


圖 3.2.2 食物氣味分布圖

接著讓果蠅從起始點座標 $(-3000, 0)$ 出發，依照食物氣味濃度的引導去尋找食物，並且設定最佳氣味濃度的初始值為 0。果蠅在每飛行一步後去判斷當下位置的氣味濃度，若比原先所設定的最佳氣味濃度高出 5 個單位時，則會將此位置更新為最佳濃度位置，表示此位置是之前所經過的範圍中，氣味濃度最高的地方。接著不斷重複此動作，直到果蠅到達食物位置為止。以下分別做「萊維飛行」(圖 3.2.3(a))與「布朗運動」(圖 3.2.3(b))模擬 1000 步的情況，藍色點為第 1000 步的位置，黑色線條為果蠅的飛行軌跡，紅色線條為果蠅的最佳氣味飛行路線。

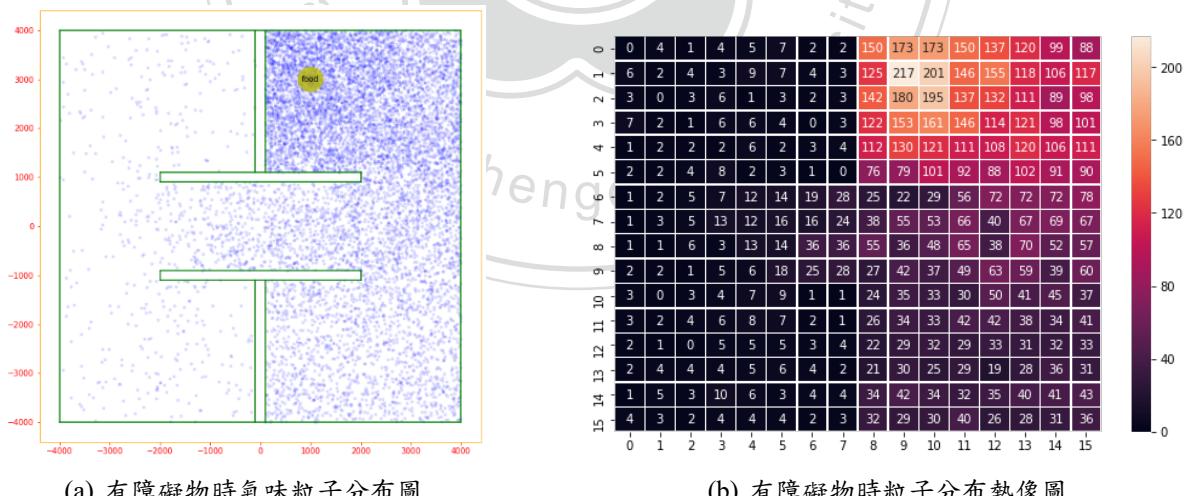


(a) 氣味引導下的萊維飛行

(b) 氣味引導下的布朗運動

圖 3.2.3 氣味引導下兩種運動模式各模擬 1000 步結果

介紹完加入食物氣味的模擬後，我們接著會加入少量的障礙物來增加模擬的複雜度，在有障礙物的情況下，氣味粒子的分布也會受到改變，增加了果蠅在覓食時的困難度。首先同樣設置模擬的活動範圍為 $[-4000, 4000] \times [-4000, 4000]$ ，食物的座標更改為 $(1000, 3000)$ ，氣味粒子一樣從食物中心以布朗運動向外擴散（圖 3.2.4(a))），藍色點為所有的氣味粒子的位置。以 500 為單位劃分為 16×16 個格子點，去統計每個格子點裡的粒子數作為每個位置的氣味濃度（圖 3.2.4(b))。



(a) 有障礙物時氣味粒子分布圖

(b) 有障礙物時粒子分布熱像圖

圖 3.2.4 有障礙物時食物氣味分布圖

接下來我們在有障礙物的情況下進行模擬，果蠅的起始座標更改至 $(-1000, -3000)$ ，在有氣味濃度的引導下去尋找食物，最佳氣味濃度的初始值一樣設為0。果蠅每飛行一步後也一樣會判斷當下位置的氣味濃度，若比原先最佳氣味濃度高出5個單位，則更新此位置為最佳濃度位置，接著不斷重複此動作，直到果蠅到達食物位置為止。以下分別做「萊維飛行」(圖3.2.5(a))與「布朗運動」(圖3.2.5(b))模擬5000步的情況，藍點為第5000步的位置，黑色線條為果蠅的飛行軌跡，紅色線條為果蠅的最佳氣味飛行路線。

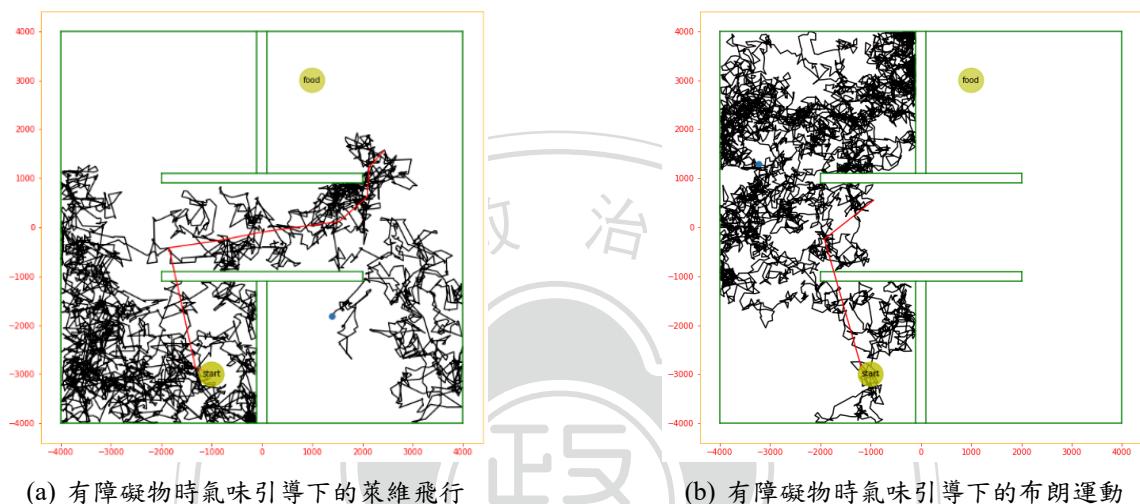


圖3.2.5 有障礙物時氣味引導下兩種運動模式各模擬5000步結果

以上的模擬都是單隻果蠅的覓食過程，所以氣味的引導並無法發揮效果，在下一個章節中我們會介紹果蠅群體的覓食過程，在互相溝通協助之下，氣味粒子的引導就成為很重要的部分，它能夠幫助果蠅群體更快速的找到食物的所在位置。

第三節 果蠅群體飛行模擬

上一節所介紹的都是單隻果蠅的飛行模擬，但實際上果蠅的覓食是集體行動的，而且有著牠們特殊的合作模式，我們依據「果蠅最佳化演算法」為基礎進行部分改良，接下來將會遵循以下流程進行果蠅的飛行模擬：

1. 每隻果蠅從起始點開始依照牠們的飛行模式隨機飛往各處。
2. 每隻果蠅偵測其所到達位置的氣味濃度，氣味濃度最高且比前一個最佳氣味濃度（初始設定為 0）高出 5 個單位之果蠅位置設置為最佳氣味位置，此時此隻果蠅會發送信號給其他夥伴，夥伴們收到信號後就會飛往最佳氣味濃度的位置。
3. 接著不斷重複第 2 點的動作，直到靠近食物為止。

以下我們分別實際模擬兩種不同運動方式的果蠅群體合作覓食的情形，並且以圖像的方式呈現模擬結果。首先一個果蠅群體會有十隻果蠅，接著設置果蠅群體的起始位置從 $(-1000, -3000)$ 出發，食物的座標為 $(1000, 3000)$ ，圖中右下角的 s 代表第一隻找到食物時的步數，較粗的紅色線條為果蠅的最佳氣味飛行路線。以下分別為十隻「萊維飛行」（圖 3.3.6(a)）與十隻「布朗運動」（圖 3.3.6(b)）模擬的情況：

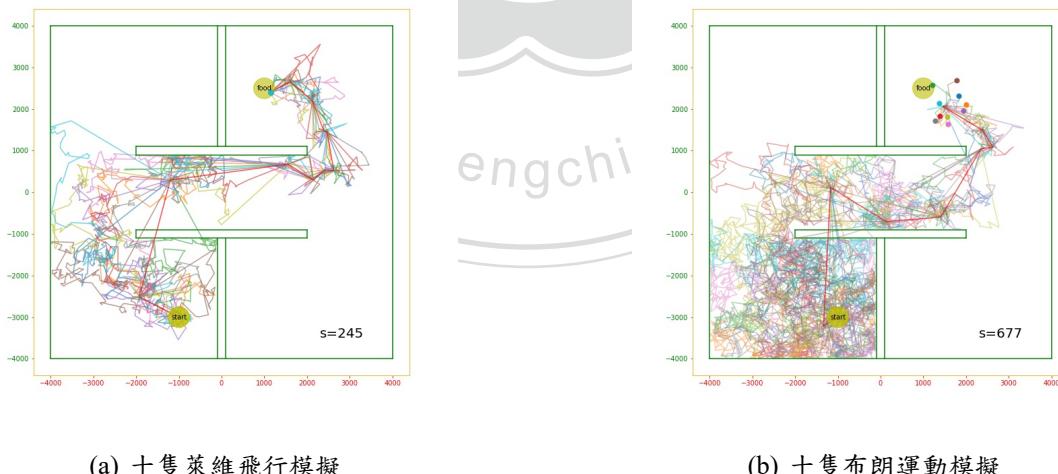


圖 3.3.6 十隻果蠅群體覓食模擬

從圖 3.3.6 中可以觀察到十隻果蠅都做「萊維飛行」的時候，原地打轉的情形的比較十隻果蠅都做「布朗運動」來的少，相較之下搜尋到食物所需要的步數也會比較低。我們分別模擬以上相同實驗各三十次，有得到的以下結果，十隻果蠅都做「萊維飛行」

的平均步數為 385.13 單位，而十隻果蠅都做「布朗運動」的平均步數為 504.63 單位。因此我們可以推測出兩種運動模式在覓食的速度上是有著明顯差異的。下一節會我們會加入繁衍與死亡兩項重要的因素，完整的模擬出實際果蠅會碰到的情況。



第四節 包含繁衍與死亡綜合模擬

此節會導入繁衍和死亡這兩個重要的因素，為此我們首先要設定一些重要參數：

1. 果蠅每 2000 步會因年老而死亡。
2. 果蠅在 1000 步內沒有找到食物會因飢餓而死亡。
3. 果蠅在 1200 步時會與最鄰近的同伴繁衍後代，後代會繼承母代的飛行模式，若母代的飛行模式不同，則隨機繼承其中一種。
4. 每一份食物只夠七隻果蠅食用，若食物用盡才會再放入新的食物。

接著我們實際模擬十隻果蠅合作覓食的 10000 步情形，果蠅從起始座標 $(-1000, -3000)$ 出發，食物的位置在座標 $(1000, 3000)$ 和座標 $(-1000, -3000)$ ，其中一個食物到達食用上限，食物就會更換至另一個位置。圖中右下角的 s 代表全部的果蠅死亡時的步數，若 10000 步以內沒有全部滅亡則會顯示 9999；foodexchange 表示更換食物的次數；Counter 裡的數字代表最後一步時每隻果蠅的狀態與數量，前者數字代表狀態，後者代表數量。數字代表狀態說明：0 代表做萊維飛行且未進食的果蠅；1 代表做布朗運動且未進食的果蠅；2 代表已死亡的果蠅；3 代表做萊維飛行且已進食的果蠅；4 代表做布朗運動且已進食的果蠅。

以下分別為十隻「萊維飛行」(圖 3.4.8(a)) 與十隻「布朗運動」(圖 3.4.8(b)) 模擬的情況：

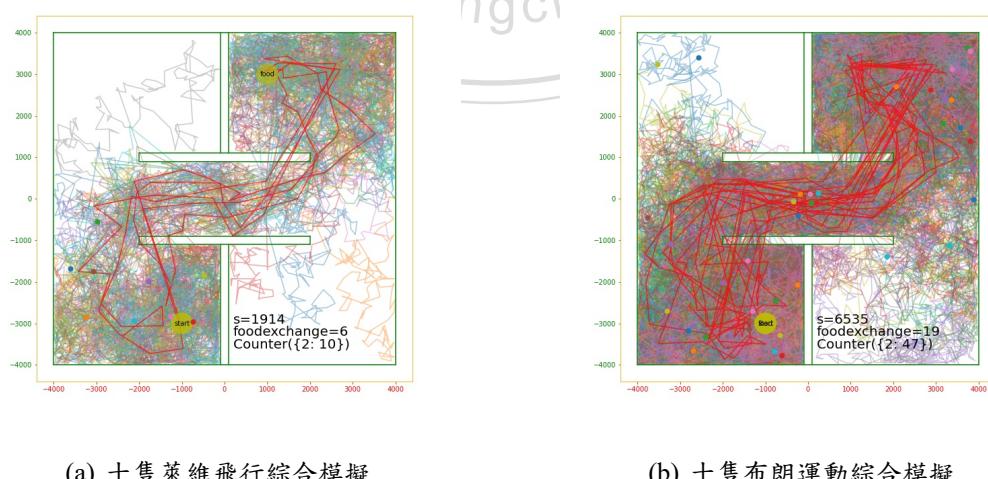


圖 3.4.7 十隻果蠅群體綜合模擬

第四章 研究結果

此章節我們會根據運動模式的比例進行十一組模擬實驗，每組實驗會有十隻果蠅做六十次的模擬，兩種運動模式的比例分別為 $10:0, 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7, 2:8, 1:9, 0:10$ ，模擬一次的步數上限為 10000 步，果蠅的活動範圍擴增到 16000×8000 ，食物的位置也增加到 4 個，其他參數在第一節會詳細說明。每次模擬實驗會以數據的方式記錄下果蠅飛行的步數、食物更換的次數、果蠅的狀態以及死亡的個數，此外還會加入捕蚊燈來增加果蠅死亡的機率。最後我們會透過以上所收集的數據來進行分析。

第一節 參數設置

1. 實驗範圍： $[0, 16000] \times [0, 8000]$
2. 起始座標：(2000, 7000)
3. 食物座標依序為：(2000, 1000)、(10000, 4000)、(14000, 3000)、(5000, 4000)
4. 飛行步數上限：10000 步
5. 一個食物的食用上限：10 隻
6. 萊維飛行自然死亡步數：1800 步
7. 布朗運動自然死亡步數：2000 步
8. 萊維飛行未進食死亡步數：900 步
9. 布朗運動未進食死亡步數：1000 步
10. 交配繁殖步數：1200 步

11. 果蠅數量：10 隻

12. 實驗環境圖：

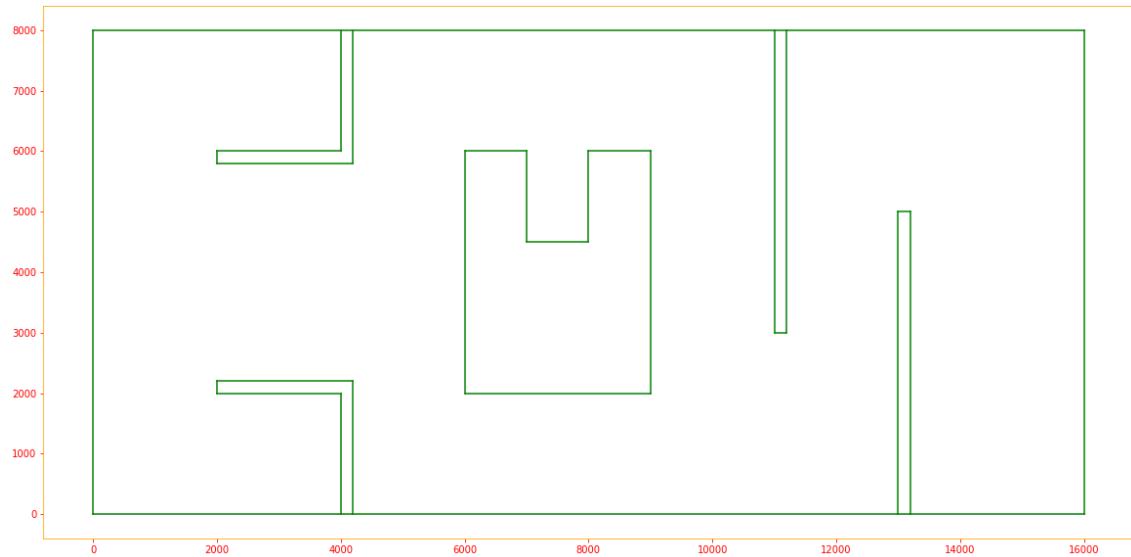


圖 4.1.1 實驗環境圖

第二節 氣味分布圖

1. 食物一座標：(2000, 1000)

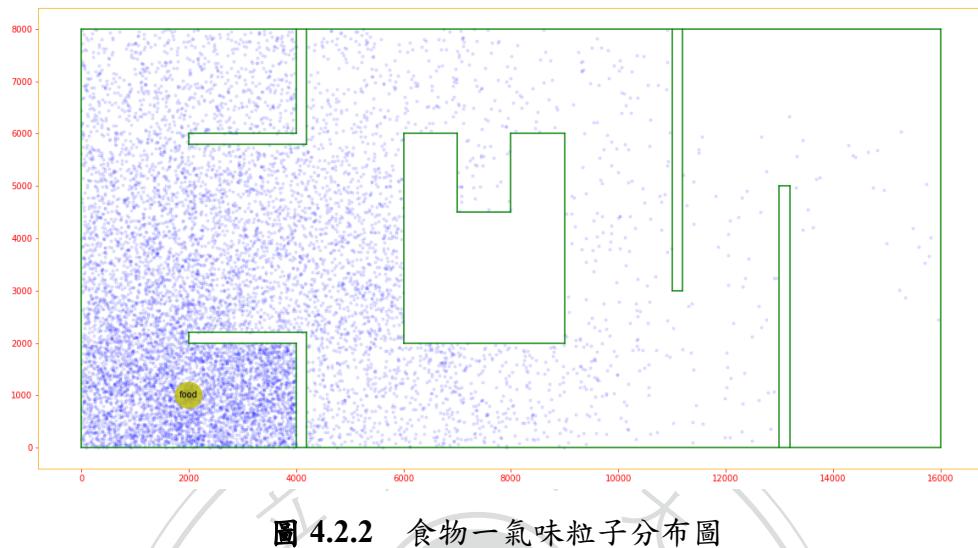


圖 4.2.2 食物一氣味粒子分布圖

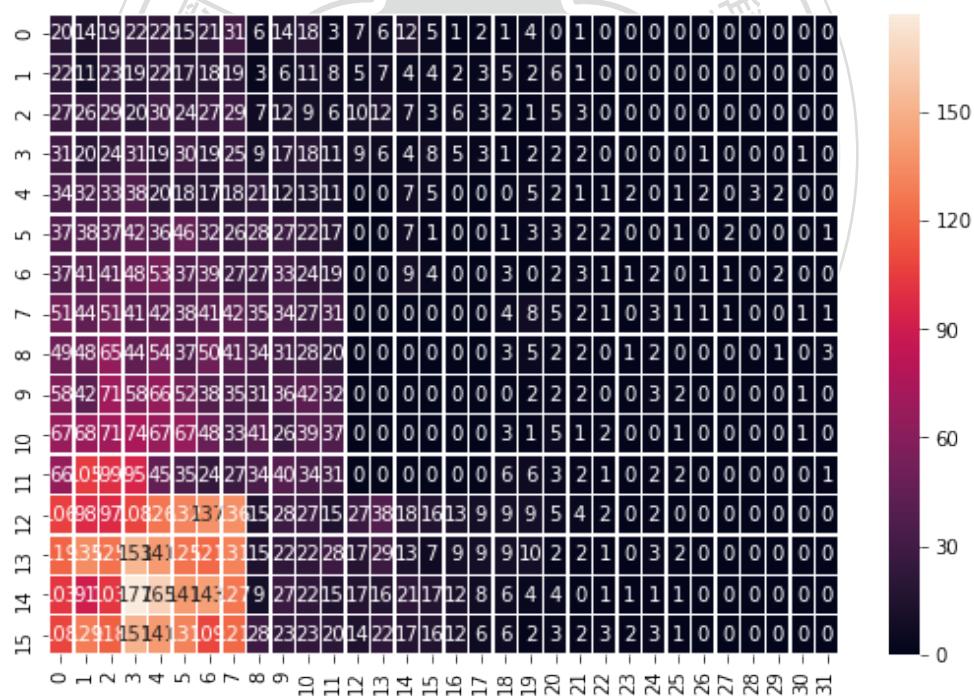


圖 4.2.3 食物一粒子分布熱像圖

2. 食物二座標 : (10000, 4000)

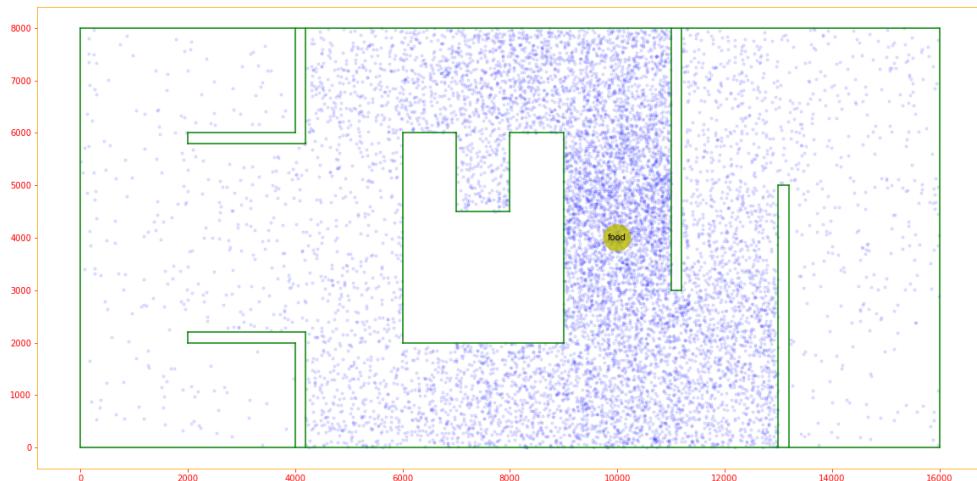


圖 4.2.4 食物二氣味粒子分布圖

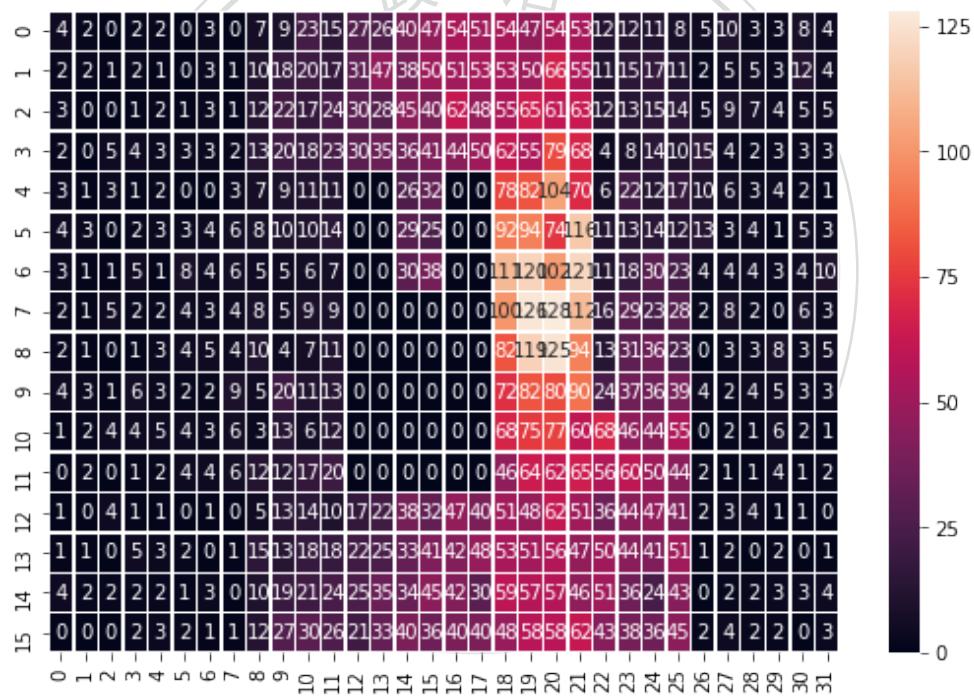


圖 4.2.5 食物二粒子分布熱像圖

3. 食物三座標 : (14000, 3000)

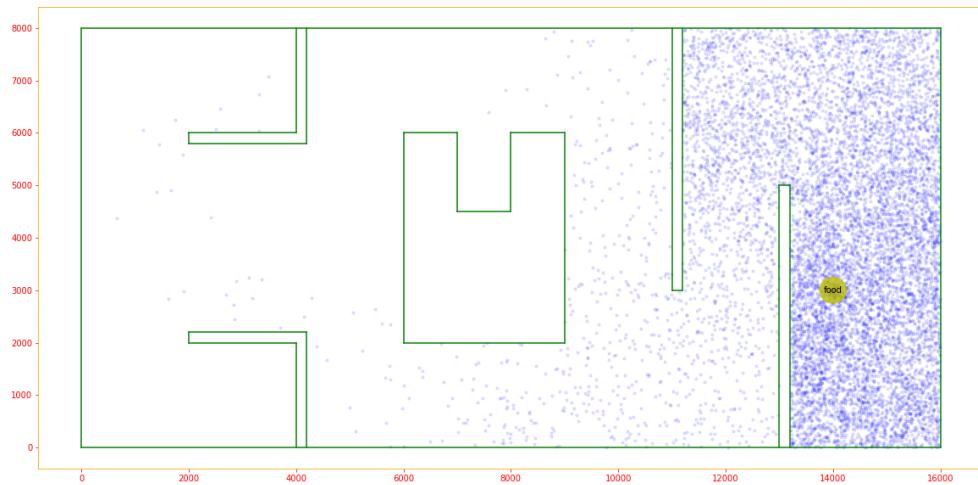


圖 4.2.6 食物三氣味粒子分布圖

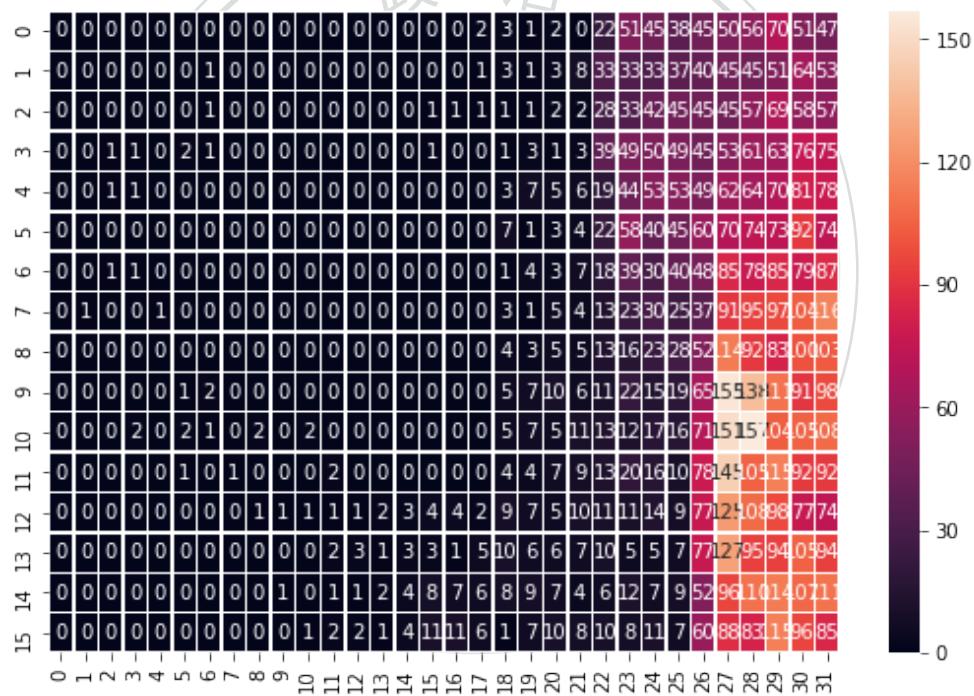


圖 4.2.7 食物三粒子分布熱像圖

4. 食物四座標：(5000, 4000)

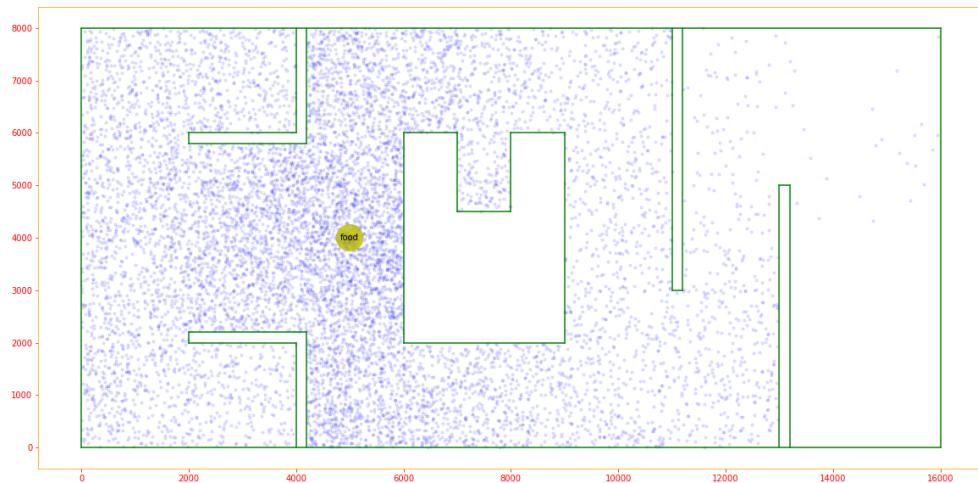
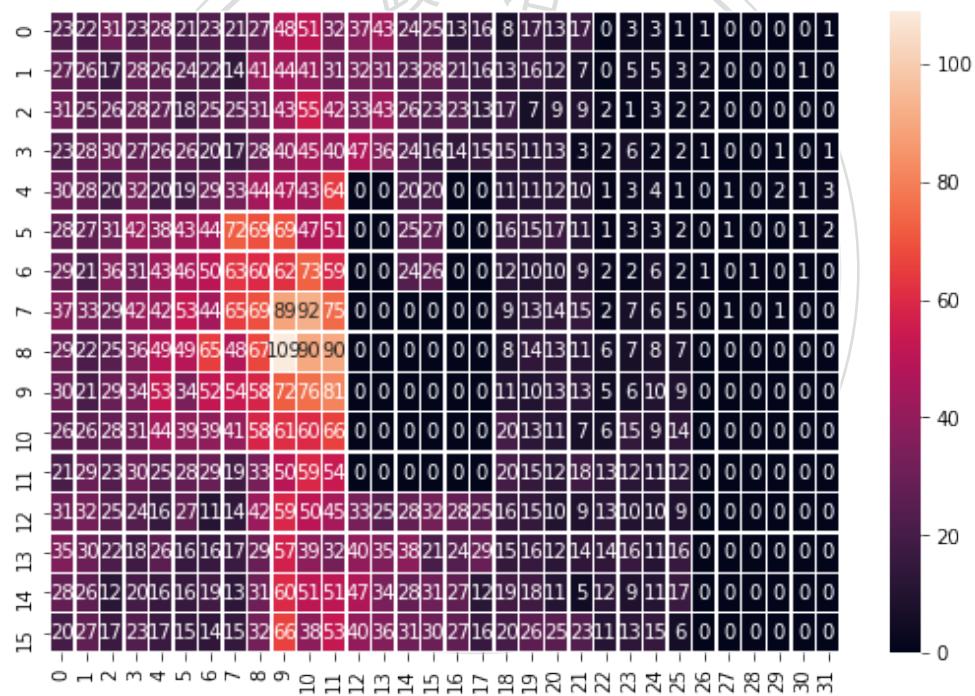


圖 4.2.8 食物四氣味粒子分布圖



第三節 實際模擬結果

符號說明：S 代表總步數、IL 代表初始狀態是做萊維飛行的果蠅數量、IB 代表初始狀態是做布朗運動的果蠅數量、FC 代表更換食物的次數、Traped 代表被捕蚊燈捕捉的果蠅數量、Natural 代表自然死亡的果蠅數量、NL 代表做萊維飛行自然死亡的果蠅數量、NB 代表做布朗運動自然死亡的果蠅數量、Starve 代表因找不到食物被餓死的果蠅數量、SL 代表做萊維飛行被餓死的果蠅數量、SB 代表做布朗運動被餓死的果蠅數量。

表 4.3.1 模擬六十次十隻都做「萊維飛行」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	1021	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
2	1190	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
3	4728	28	0	5	0	10	10	0	17	17	0
4	1110	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
5	1177	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
6	2379	16	0	3	0	4	4	0	12	12	0
7	3297	28	0	5	1	7	7	0	20	20	0
8	2151	16	0	3	0	6	6	0	10	10	0
9	1053	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
10	1055	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
11	3301	25	0	3	1	0	0	0	23	23	0
12	1095	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
13	2263	16	0	3	0	6	6	0	10	10	0

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.1 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
14	2101	19	0	3	0	9	9	0	10	10	0
15	1017	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
16	1062	10	0	1	0	0	0	0	9	9	0
17	1188	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
18	2207	16	0	3	1	4	4	0	10	10	0
19	1079	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
20	996	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
21	2101	18	0	3	0	0	0	0	18	18	0
22	1093	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
23	3301	19	0	3	0	5	5	0	14	14	0
24	4501	20	0	1	0	7	7	0	13	13	0
25	2101	16	0	3	0	6	6	0	10	10	0
26	1075	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
27	1052	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
28	1037	10	0	1	0	0	0	0	9	9	0
29	1055	10	0	1	0	0	0	0	9	9	0
30	2101	20	0	3	0	10	10	0	10	10	0
31	2101	14	0	1	0	4	4	0	9	9	0
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.1 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
32	2397	19	0	3	1	4	4	0	13	13	0
33	2104	20	0	3	0	10	10	0	10	10	0
34	1030	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
35	10000	38	0	2	3	12	12	0	19	19	0
36	1166	10	0	1	0	0	0	0	9	9	0
37	2099	16	0	3	0	6	6	0	10	10	0
38	1043	10	0	1	0	0	0	0	9	9	0
39	1099	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
40	1067	10	0	1	0	0	0	0	9	9	0
41	2098	16	0	3	0	6	6	0	10	10	0
42	3301	26	0	3	1	0	0	0	25	25	0
43	1135	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
44	2269	15	0	3	0	5	5	0	9	9	0
45	2097	20	0	3	0	0	0	0	20	20	0
46	1141	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
47	4498	34	0	7	0	10	10	0	24	24	0
48	1147	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
49	1131	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.1 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
50	1046	10	0	1	0	0	0	0	9	9	0
51	4497	40	0	7	0	12	12	0	28	28	0
52	963	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
53	3301	28	0	7	1	18	18	0	9	9	0
54	5901	50	0	11	0	27	27	0	23	23	0
55	1003	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
56	3296	30	0	7	0	5	5	0	25	25	0
57	3364	30	0	7	0	20	20	0	9	9	0
58	2096	16	0	3	0	6	6	0	10	10	0
59	1045	10	0	1	0	0	0	0	10	10	0
60	3333	19	0	5	1	9	9	0	9	9	0

表 4.3.2 模擬六十次九隻做「萊維飛行」、一隻做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	2237	15	1	3	0	6	6	0	9	8	1
2	993	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
3	3192	16	3	3	1	9	7	2	8	8	0
4	2255	15	2	3	0	6	6	0	11	9	2
5	2101	19	1	3	0	10	9	1	10	10	0
6	3300	23	3	3	0	6	5	1	19	18	1
7	2101	14	2	1	0	0	0	0	15	14	1
8	4601	31	6	7	1	6	5	1	30	25	5
9	2096	18	2	3	0	6	5	1	13	13	0
10	2135	16	2	3	0	7	6	1	10	10	0
11	2096	14	2	3	1	6	5	1	8	8	0
12	7156	46	3	11	0	19	17	2	30	29	1
13	1029	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
14	1081	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
15	1133	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
16	2397	16	1	3	0	6	6	0	10	9	1
17	1077	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.2 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
18	1014	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
19	1199	9	1	1	1	0	0	0	9	9	0
20	2272	14	1	3	1	5	5	0	9	9	0
21	1023	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
22	5751	44	6	11	0	14	11	3	35	33	2
23	2277	15	1	3	0	6	5	1	10	10	0
24	8000	19	15	7	4	17	9	8	12	10	2
25	1193	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
26	1077	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
27	997	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
28	1101	9	1	1	0	0	0	0	9	8	1
29	1062	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
30	2132	14	2	3	0	6	5	1	9	9	0
31	2101	18	2	3	0	6	5	1	13	13	0
32	1055	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
33	2100	19	1	3	0	0	0	0	20	19	1
34	3533	25	1	5	0	11	10	1	15	15	0
35	4497	33	1	7	0	5	5	0	29	28	1

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.2 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
36	3440	24	2	7	0	9	7	2	17	17	0
37	979	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
38	1139	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
39	1036	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
40	2285	19	1	3	0	10	9	1	10	10	0
41	2118	15	1	3	0	6	6	0	10	9	1
42	1106	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
43	2172	15	1	3	0	6	5	1	10	10	0
44	1040	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
45	3386	20	1	3	0	4	4	0	16	15	1
46	3302	29	1	7	0	15	14	1	15	15	0
47	1180	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
48	2365	18	2	3	0	0	0	0	19	17	2
49	2101	15	1	3	0	6	5	1	10	10	0
50	2338	15	1	3	0	6	5	1	9	9	0
51	4599	23	5	7	0	9	7	2	19	16	3
52	1092	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
53	1107	9	1	1	1	0	0	0	8	8	0

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.2 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
54	1157	9	1	1	1	0	0	0	9	9	0
55	2101	17	1	3	1	0	0	0	17	17	0
56	2121	15	1	3	0	6	6	0	9	8	1
57	3301	20	1	3	0	2	1	1	19	19	0
58	4750	24	3	7	3	10	9	1	13	12	1
59	1035	9	1	1	0	0	0	0	9	9	0
60	3465	18	2	5	0	10	9	1	9	8	1

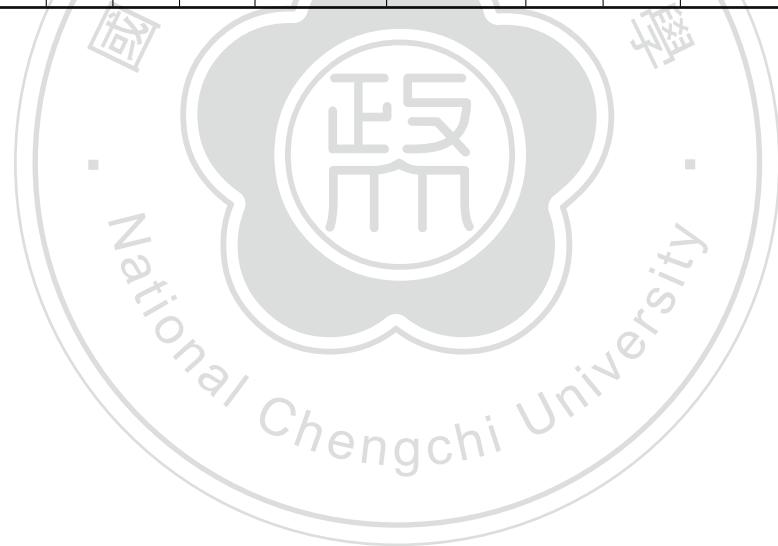


表 4.3.3 模擬六十次八隻做「萊維飛行」、兩隻做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	2201	13	4	3	0	0	0	0	17	13	4
2	4601	9	11	1	4	7	1	6	9	7	2
3	5800	31	15	11	3	19	11	8	24	18	6
4	2200	13	4	3	1	6	6	0	10	6	4
5	2101	15	3	3	0	2	2	0	15	13	2
6	2234	13	3	3	0	6	5	1	9	8	1
7	2347	13	3	3	1	1	1	0	13	11	2
8	2197	8	4	1	0	0	0	0	12	8	4
9	3297	19	5	5	2	7	5	2	15	13	2
10	3301	16	4	3	0	1	1	0	18	15	3
11	2201	10	3	1	2	2	2	0	8	5	3
12	2206	13	4	3	1	3	2	1	12	10	2
13	1123	8	2	1	0	0	0	0	9	8	1
14	2200	14	4	3	0	4	4	0	14	10	4
15	1183	8	2	1	0	0	0	0	10	8	2
16	1036	8	2	1	0	0	0	0	9	7	2
17	2216	12	4	3	0	6	5	1	10	7	3

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.3 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
18	2197	15	5	3	0	9	8	1	10	7	3
19	2354	17	3	3	0	5	3	2	14	14	0
20	1149	8	2	1	0	0	0	0	10	8	2
21	2199	15	4	3	0	0	0	0	19	15	4
22	2201	14	4	3	0	8	6	2	10	8	2
23	2101	17	3	3	0	0	0	0	19	17	2
24	2283	16	4	3	0	10	8	2	10	8	2
25	10000	39	47	23	0	41	19	22	37	20	17
26	1254	8	4	1	1	0	0	0	10	8	2
27	2096	16	3	3	1	0	0	0	17	16	1
28	3401	8	6	1	2	2	0	2	9	7	2
29	4574	17	4	5	0	8	7	1	13	10	3
30	1100	8	2	1	0	0	0	0	10	8	2
31	2101	10	2	1	3	2	2	0	6	5	1
32	2201	16	4	3	0	10	8	2	10	8	2
33	6899	49	4	15	0	38	34	4	15	15	0
34	3437	20	4	7	0	13	11	2	10	9	1
35	4501	26	9	7	0	15	11	4	19	15	4
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.3 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
36	2338	12	2	3	2	4	3	1	8	8	0
37	2349	12	4	3	2	3	3	0	10	7	3
38	2199	14	4	3	0	0	0	0	18	14	4
39	3301	24	4	7	0	10	8	2	17	16	1
40	988	8	2	1	0	0	0	0	9	8	1
41	4787	26	4	11	0	17	14	3	13	12	1
42	1192	8	2	1	0	0	0	0	10	8	2
43	4501	24	6	7	4	8	7	1	17	13	4
44	2197	16	4	5	0	10	8	2	10	8	2
45	3597	20	4	7	0	8	5	3	15	15	0
46	4601	17	10	7	0	10	7	3	17	10	7
47	10000	51	27	23	0	43	27	16	28	20	8
48	2198	12	4	3	0	5	3	2	10	9	1
49	3580	19	7	7	0	11	7	4	14	12	2
50	1128	8	2	1	0	0	0	0	9	8	1
51	5959	31	5	9	0	8	7	1	27	23	4
52	4501	27	6	7	1	14	11	3	18	15	3
53	4500	26	2	7	1	9	8	1	18	17	1
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.3 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
54	1097	8	2	1	0	0	0	0	9	8	1
55	3596	25	3	7	2	9	8	1	17	16	1
56	4666	33	7	11	0	21	15	6	18	18	0
57	3397	22	8	7	0	10	8	2	20	14	6
58	6901	32	4	11	4	15	12	3	17	17	0
59	4601	16	9	7	2	8	5	3	15	9	6
60	3301	16	5	3	1	2	2	0	17	13	4



表 4.3.4 模擬六十次七隻做「萊維飛行」、三隻做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	1116	7	3	1	0	0	0	0	9	7	2
2	3300	27	3	5	0	20	17	3	10	10	0
3	4498	20	8	7	0	15	10	5	12	10	2
4	2201	15	5	3	0	0	0	0	20	15	5
5	1105	7	3	1	1	0	0	0	8	7	1
6	1124	7	3	1	1	0	0	0	8	5	3
7	2331	8	7	3	2	4	1	3	8	5	3
8	1146	7	3	1	0	0	0	0	10	7	3
9	2268	9	6	3	0	5	3	2	10	6	4
10	2201	11	5	3	3	4	2	2	8	7	1
11	1130	7	3	1	0	0	0	0	9	7	2
12	1100	7	3	1	0	0	0	0	10	7	3
13	3192	14	7	3	2	6	5	1	12	9	3
14	1986	7	6	1	6	1	0	1	5	5	0
15	6793	14	28	11	4	24	9	15	13	5	8
16	3395	12	11	7	2	12	7	5	8	4	4
17	2201	11	6	3	0	5	3	2	12	8	4

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.4 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
18	3480	22	8	7	0	15	9	6	15	13	2
19	999	7	3	1	0	0	0	0	9	7	2
20	5700	43	3	11	0	12	10	2	33	32	1
21	5758	24	12	9	0	18	14	4	17	10	7
22	2201	15	5	3	0	0	0	0	20	15	5
23	3580	24	6	7	0	12	7	5	17	17	0
24	4601	23	10	7	1	11	6	5	21	16	5
25	4400	7	11	1	1	5	0	5	11	7	4
26	4601	23	13	7	0	10	7	3	26	16	10
27	1162	7	3	1	0	0	0	0	10	7	3
28	4497	24	5	7	0	9	5	4	20	19	1
29	1128	7	3	1	0	0	0	0	9	7	2
30	2196	15	5	3	0	9	7	2	11	8	3
31	9594	7	17	1	1	14	0	14	8	7	1
32	4597	24	7	7	0	6	3	3	24	20	4
33	3547	11	13	7	0	12	4	8	11	7	4
34	3480	13	11	7	1	14	6	8	8	7	1
35	4500	27	3	7	0	13	11	2	17	16	1
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.4 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
36	7001	31	22	15	0	34	19	15	19	12	7
37	2257	12	4	3	0	6	4	2	9	8	1
38	2101	10	3	1	2	3	2	1	7	6	1
39	2200	11	5	3	0	6	4	2	10	7	3
40	3401	19	7	7	0	15	10	5	11	9	2
41	3303	15	3	3	3	2	1	1	12	12	0
42	4501	19	3	4	3	8	6	2	10	10	0
43	2326	11	5	3	1	6	5	1	9	6	3
44	4656	26	11	11	1	22	15	7	13	10	3
45	5819	30	20	15	0	34	18	16	15	12	3
46	5600	11	12	3	1	12	4	8	9	7	2
47	10000	31	24	15	0	17	9	8	34	19	15
48	2095	10	4	2	4	0	0	0	10	9	1
49	2200	10	6	3	0	6	4	2	10	6	4
50	1153	7	3	1	0	0	0	0	10	7	3
51	2201	7	5	1	0	0	0	0	12	7	5
52	2190	13	7	3	0	10	7	3	10	6	4
53	2352	10	4	3	0	4	3	1	9	7	2
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.4 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
54	3401	17	8	7	1	12	8	4	11	8	3
55	8201	36	28	15	0	24	12	12	40	24	16
56	2196	12	8	3	0	6	6	0	14	6	8
57	5841	36	14	15	0	30	21	9	19	15	4
58	3300	19	5	3	0	0	0	0	23	19	4
59	2200	12	5	3	0	5	3	2	12	9	3
60	2263	13	3	3	0	3	3	0	12	9	3



表 4.3.5 模擬六十次六隻做「萊維飛行」、四隻做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	10000	44	21	19	1	44	30	14	18	14	4
2	2385	13	5	5	0	8	5	3	9	8	1
3	2196	11	9	3	0	6	6	0	14	5	9
4	4599	11	19	7	2	3	0	3	25	11	14
5	1014	6	4	1	2	0	0	0	7	5	2
6	1134	6	4	1	0	0	0	0	9	6	3
7	3396	18	10	7	0	10	6	4	18	12	6
8	1103	6	4	1	0	0	0	0	9	6	3
9	4386	10	14	5	4	4	0	4	15	10	5
10	8201	26	29	15	0	26	11	15	29	15	14
11	2197	11	7	3	1	6	4	2	11	7	4
12	4596	15	14	7	0	7	3	4	22	12	10
13	4501	24	9	7	0	14	10	4	18	14	4
14	5800	21	24	11	0	20	11	9	25	10	15
15	2196	10	7	3	0	7	3	4	10	7	3
16	2220	11	4	3	0	5	3	2	10	8	2
17	6952	15	17	7	2	18	9	9	11	6	5

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.5 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
18	4501	25	7	7	0	11	7	4	20	18	2
19	2388	11	4	3	2	4	3	1	8	6	2
20	3458	13	9	6	0	8	5	3	13	8	5
21	2201	9	9	3	0	2	2	0	16	7	9
22	3518	20	8	7	0	15	10	5	13	10	3
23	2201	9	11	3	0	6	6	0	14	3	11
24	4560	14	10	5	1	4	2	2	18	12	6
25	7062	35	21	15	0	24	12	12	31	23	8
26	3401	17	13	7	0	18	11	7	12	6	6
27	4714	19	7	7	0	13	10	3	12	8	4
28	1083	6	4	1	0	0	0	0	10	6	4
29	1103	6	4	1	1	0	0	0	8	5	3
30	2368	9	6	3	1	5	3	2	9	6	3
31	10000	22	39	19	1	25	9	16	27	12	15
32	5693	16	12	9	3	14	6	8	10	8	2
33	10000	17	54	27	0	33	5	28	26	12	14
34	1118	6	4	1	0	0	0	0	10	6	4
35	3396	7	13	3	0	5	2	3	15	5	10
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.5 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
36	2201	9	7	3	1	3	1	2	12	7	5
37	1098	6	4	1	0	0	0	0	9	6	3
38	1875	9	10	3	8	0	0	0	10	6	4
39	4729	27	13	11	0	22	12	10	18	15	3
40	5800	21	11	5	0	6	3	3	26	18	8
41	5939	29	17	15	0	23	15	8	22	14	8
42	3481	18	9	7	1	14	11	3	12	6	6
43	2201	10	9	3	0	0	0	0	19	10	9
44	3538	14	11	7	0	15	8	7	10	6	4
45	2200	11	8	3	0	6	3	3	13	8	5
46	3398	17	9	7	0	15	8	7	11	9	2
47	2344	10	6	3	0	1	0	1	14	10	4
48	8265	15	37	19	1	27	6	21	24	9	15
49	4601	14	12	7	0	13	7	6	13	7	6
50	2201	13	6	3	1	9	5	4	9	7	2
51	2197	12	7	3	0	4	4	0	15	8	7
52	3299	21	7	7	0	13	10	3	14	11	3
53	4501	26	6	9	1	9	6	3	21	18	3
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.5 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
54	3469	16	10	7	0	14	7	7	11	9	2
55	2304	10	6	3	0	3	2	1	12	8	4
56	4601	9	15	5	2	10	3	7	11	6	5
57	2201	9	8	3	1	2	2	0	14	6	8
58	10000	41	33	23	1	49	27	22	18	12	6
59	10000	42	27	23	2	36	18	18	27	20	7
60	3560	17	10	7	0	8	4	4	18	13	5



表 4.3.6 模擬六十次五隻做「萊維飛行」、五隻做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	3525	16	14	7	0	10	2	8	20	14	6
2	3399	10	16	7	0	11	3	8	15	7	8
3	4601	28	12	7	0	10	7	3	30	21	9
4	1060	5	5	1	0	0	0	0	10	5	5
5	2200	9	10	3	1	3	3	0	15	6	9
6	5800	17	20	11	1	15	4	11	21	13	8
7	4623	14	9	5	1	4	2	2	17	12	5
8	8311	7	39	19	1	33	3	30	11	4	7
9	7001	19	36	19	0	33	8	25	22	11	11
10	4600	17	14	7	1	14	11	3	16	6	10
11	5696	29	9	11	0	14	9	5	24	20	4
12	3301	19	9	5	1	3	3	0	23	16	7
13	3401	8	12	3	0	6	3	3	14	5	9
14	10000	16	14	3	2	14	7	7	10	7	3
15	10000	19	32	14	1	23	7	16	23	11	12
16	1144	5	5	1	0	0	0	0	10	5	5
17	1138	5	5	1	0	0	0	0	10	5	5

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.6 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
18	10000	9	51	29	1	44	5	39	7	4	3
19	2223	7	9	3	0	6	2	4	10	5	5
20	1101	5	5	1	0	0	0	0	9	5	4
21	7159	15	41	19	0	37	11	26	19	4	15
22	3401	13	12	7	0	6	3	3	19	10	9
23	2112	10	6	3	0	5	3	2	10	7	3
24	4501	18	12	7	0	7	2	5	23	16	7
25	2201	9	7	3	0	6	2	4	10	7	3
26	2200	6	10	3	0	6	1	5	10	5	5
27	8201	8	23	6	3	15	5	10	13	2	11
28	10000	17	65	31	1	47	9	38	18	8	10
29	5796	14	23	11	0	14	8	6	23	6	17
30	2201	9	8	3	0	0	0	0	17	9	8
31	7001	16	22	7	0	17	2	15	21	14	7
32	6896	37	7	11	4	17	12	5	23	23	0
33	4397	7	11	3	3	3	1	2	11	6	5
34	2197	9	7	3	2	3	2	1	10	6	4
35	1109	5	5	1	0	0	0	0	10	5	5
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.6 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
36	4598	13	15	7	0	7	1	6	20	12	8
37	8201	8	32	15	1	19	3	16	19	5	14
38	1101	5	5	1	0	0	0	0	9	5	4
39	3399	12	13	7	0	10	5	5	15	7	8
40	4665	13	21	11	0	22	8	14	12	5	7
41	1158	5	5	1	0	0	0	0	9	5	4
42	2199	10	7	3	0	0	0	0	17	10	7
43	2201	10	8	3	2	4	4	0	12	5	7
44	5994	9	25	15	1	24	4	20	8	4	4
45	2293	10	6	3	2	5	3	2	9	7	2
46	8101	42	24	15	0	20	10	10	45	32	13
47	5716	8	18	9	1	12	2	10	12	6	6
48	5801	7	23	7	1	5	0	5	24	7	17
49	5801	18	18	11	0	10	2	8	26	16	10
50	5799	21	22	11	1	22	10	12	20	10	10
51	3551	16	12	7	1	18	11	7	9	5	4
52	4599	11	20	7	0	13	4	9	18	7	11
53	8101	45	13	15	0	31	20	11	27	25	2
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.6 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
54	10000	8	64	34	0	47	3	44	11	5	6
55	4594	15	23	9	4	8	3	5	26	10	16
56	2197	7	9	3	1	6	3	3	9	3	6
57	8101	28	16	13	3	22	12	10	19	14	5
58	3400	17	13	7	0	8	3	5	22	14	8
59	10000	6	52	23	0	34	4	30	12	2	10
60	10000	24	46	27	3	42	15	27	18	9	9

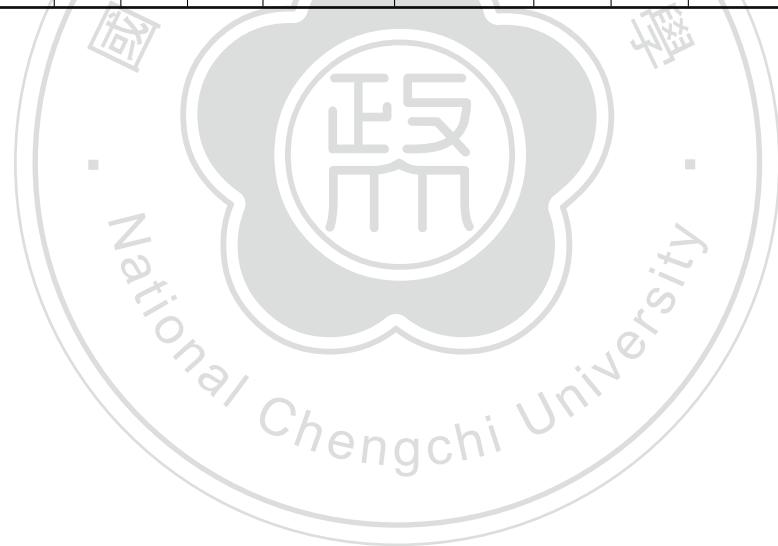


表 4.3.7 模擬六十次四隻做「萊維飛行」、六隻做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	5800	20	28	15	1	30	8	22	17	11	6
2	10000	27	53	29	0	50	17	33	15	9	6
3	2201	7	9	3	1	6	2	4	9	4	5
4	2201	6	12	3	0	1	1	0	17	5	12
5	5801	10	24	11	5	17	6	11	11	4	7
6	9396	4	42	23	1	30	3	27	14	1	13
7	1146	4	6	1	2	0	0	0	7	3	4
8	7007	22	27	13	3	19	7	12	26	15	11
9	3399	12	17	7	0	11	8	3	18	4	14
10	3401	4	22	7	0	8	2	6	18	2	16
11	5699	25	15	11	0	21	13	8	18	12	6
12	2196	5	11	3	1	6	2	4	9	3	6
13	4501	17	11	9	0	18	11	7	9	5	4
14	8363	25	35	19	1	30	12	18	29	13	16
15	2196	8	10	3	0	2	2	0	16	6	10
16	5837	8	32	19	0	30	5	25	10	3	7
17	3396	14	14	7	0	9	4	5	19	10	9

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.7 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
18	4649	15	25	11	0	18	7	11	21	8	13
19	3399	7	23	7	0	16	2	14	14	5	9
20	3497	6	16	7	1	11	2	9	10	4	6
21	2196	7	13	3	0	4	4	0	16	3	13
22	9440	40	36	23	5	31	12	19	39	26	13
23	3516	14	13	7	2	9	3	6	15	9	6
24	4601	7	18	7	1	12	3	9	12	4	8
25	5801	6	24	11	0	12	2	10	18	4	14
26	5801	9	25	9	1	18	4	14	14	5	9
27	2200	9	10	3	0	0	0	0	19	9	10
28	2201	5	12	3	0	3	2	1	14	3	11
29	3396	7	20	7	0	9	3	6	18	4	14
30	5920	15	20	11	1	15	6	9	18	9	9
31	10000	26	39	18	1	39	14	25	21	10	11
32	8101	19	25	11	4	16	7	9	23	11	12
33	10000	18	48	23	1	32	9	23	26	9	17
34	4701	22	15	11	0	15	8	7	21	14	7
35	10000	39	41	23	2	34	15	19	39	21	18
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.7 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
36	3401	11	16	7	1	16	7	9	10	4	6
37	8201	16	42	21	0	38	10	28	19	6	13
38	4599	13	19	11	0	22	8	14	9	4	5
39	3529	6	16	7	0	9	2	7	12	4	8
40	2198	7	10	3	2	4	3	1	11	4	7
41	7000	12	33	15	1	19	4	15	25	8	17
42	3401	11	11	7	0	6	3	3	16	8	8
43	9401	9	46	19	3	24	6	18	28	3	25
44	4596	15	18	7	0	13	7	6	20	8	12
45	3401	9	14	3	2	4	0	4	16	9	7
46	9401	7	34	13	0	19	1	18	22	6	16
47	7125	22	28	19	4	25	7	18	20	14	6
48	2195	8	12	3	0	4	4	0	16	4	12
49	10000	7	69	27	3	43	6	37	16	1	15
50	6999	22	38	15	1	24	9	15	35	13	22
51	10000	4	53	15	0	32	4	28	21	0	21
52	3558	8	16	7	0	10	3	7	14	5	9
53	5696	29	14	15	5	24	15	9	14	13	1
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.7 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
54	3437	12	9	7	2	9	5	4	9	6	3
55	9301	30	18	12	0	22	14	8	25	16	9
56	9199	31	33	19	1	33	12	21	29	19	10
57	5801	7	24	7	3	15	4	11	12	3	9
58	2200	7	11	3	0	2	2	0	16	5	11
59	2201	4	9	1	1	3	1	2	8	3	5
60	4601	19	17	11	0	16	9	7	20	10	10



表 4.3.8 模擬六十次三隻做「萊維飛行」、七隻做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	3399	7	19	7	0	10	3	7	16	4	12
2	2200	6	12	3	0	8	1	7	10	5	5
3	3401	9	11	5	1	5	1	4	14	8	6
4	7001	14	20	9	3	15	9	6	15	4	11
5	8198	20	34	19	0	36	9	27	18	11	7
6	10000	10	53	25	1	37	3	34	21	7	14
7	10000	29	47	27	0	46	15	31	25	13	12
8	7166	3	47	19	0	24	2	22	26	1	25
9	8326	12	30	17	0	18	4	14	23	8	15
10	10000	6	70	35	0	55	3	52	5	3	2
11	10000	15	55	23	1	39	6	33	27	8	19
12	5801	16	24	11	3	20	7	13	17	9	8
13	10000	8	53	25	1	42	6	36	15	2	13
14	4393	9	13	3	2	7	2	5	12	7	5
15	2200	3	13	3	0	6	1	5	10	2	8
16	9401	3	52	23	1	31	1	30	23	2	21
17	8201	12	36	15	0	26	5	21	22	7	15

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.8 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
18	10000	16	59	35	1	55	13	42	14	3	11
19	10000	13	61	27	0	43	8	35	15	5	10
20	4601	17	23	11	0	20	7	13	20	10	10
21	8300	3	45	19	0	27	1	26	20	2	18
22	9401	9	47	17	2	29	7	22	24	2	22
23	5983	14	36	19	0	30	8	22	19	6	13
24	9261	5	43	19	1	22	1	21	24	4	20
25	5701	10	18	7	2	13	3	10	13	7	6
26	8101	21	28	19	0	31	11	20	17	10	7
27	3414	3	19	7	0	12	0	12	10	3	7
28	4598	3	28	11	0	14	1	13	17	2	15
29	4642	3	28	11	0	21	0	21	10	3	7
30	5798	9	32	15	0	22	5	17	19	4	15
31	8201	20	49	19	1	28	6	22	40	14	26
32	9200	7	35	13	6	23	2	21	12	5	7
33	10000	41	31	23	2	19	9	10	37	21	16
34	7001	22	30	15	0	37	17	20	15	5	10
35	4598	10	19	7	0	13	3	10	16	7	9
Continued on next page(繼續下一頁)											

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.8 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
36	5594	5	30	11	3	17	3	14	14	2	12
37	9296	20	36	23	1	36	9	27	18	11	7
38	1142	3	7	1	2	0	0	0	7	3	4
39	5756	10	23	11	2	22	5	17	8	4	4
40	1131	3	7	1	0	0	0	0	10	3	7
41	7135	9	29	15	4	21	7	14	12	2	10
42	9396	15	45	23	0	34	8	26	26	7	19
43	4048	3	34	15	18	18	2	16	1	1	0
44	2196	6	13	3	0	0	0	0	19	6	13
45	3531	7	20	7	3	15	4	11	9	2	7
46	10000	11	59	27	0	49	9	40	15	2	13
47	8100	48	17	15	2	34	21	13	29	27	2
48	10000	14	62	27	0	42	11	31	20	3	17
49	1096	3	7	1	0	0	0	0	9	3	6
50	5956	5	31	15	2	24	1	23	10	4	6
51	8201	17	32	17	5	36	14	22	7	3	4
52	2341	6	14	5	0	8	1	7	12	5	7
53	7001	6	26	7	0	14	3	11	17	3	14
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.8 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
54	1136	3	7	1	0	0	0	0	10	3	7
55	6785	3	37	15	2	18	0	18	19	3	16
56	8250	21	30	13	0	18	8	10	33	13	20
57	10000	10	65	24	2	42	6	36	28	3	25
58	8209	13	34	15	0	31	10	21	15	3	12
59	10000	3	63	32	2	44	1	43	11	2	9
60	7001	7	25	11	0	10	1	9	22	6	16



表 4.3.9 模擬六十次二隻做「萊維飛行」、八隻做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	7001	11	34	15	2	21	2	19	22	9	13
2	3401	2	20	5	0	8	0	8	13	2	11
3	4678	2	26	11	0	18	0	18	9	2	7
4	5701	17	19	11	1	19	6	13	16	10	6
5	7001	11	26	7	3	15	4	11	18	7	11
6	4601	5	26	7	1	15	2	13	15	3	12
8	5832	2	30	9	0	10	0	10	22	2	20
9	8201	7	49	18	0	34	4	30	22	3	19
10	5814	12	36	19	2	38	8	30	8	4	4
12	3398	3	14	3	0	4	1	3	13	2	11
13	10000	8	74	37	1	50	6	44	13	2	11
14	3466	2	24	7	0	13	0	13	13	2	11
16	4763	9	30	15	2	23	4	19	14	4	10
17	10000	3	44	21	1	28	0	28	14	3	11
18	10000	10	56	27	4	33	4	29	19	5	14
19	8193	17	42	21	5	37	11	26	16	6	10
20	5801	12	28	11	1	23	6	17	16	6	10

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.9 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
21	4598	8	29	11	0	18	4	14	19	4	15
22	5942	11	36	19	6	28	9	19	13	2	11
23	10000	5	71	29	1	49	2	47	18	3	15
24	7178	22	27	15	6	33	14	19	9	6	3
25	10000	4	67	33	4	42	3	39	13	1	12
26	3519	11	19	7	0	14	2	12	16	9	7
27	3398	6	18	7	0	7	1	6	17	5	12
28	8296	3	58	23	0	31	2	29	29	1	28
29	4601	2	38	11	0	18	0	18	22	2	20
30	4627	6	28	11	0	19	2	17	15	4	11
31	8299	24	34	19	0	32	13	19	25	11	14
33	10000	4	51	26	0	32	2	30	15	2	13
34	10000	5	59	23	1	36	1	35	23	4	19
35	8369	11	58	23	0	54	8	46	15	3	12
36	8199	15	49	27	1	47	10	37	16	5	11
37	4632	4	32	11	0	13	2	11	23	2	21
38	5801	12	27	15	2	23	7	16	14	4	10
39	1128	2	8	1	0	0	0	0	9	2	7
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.9 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
40	10000	7	76	35	1	61	5	56	3	1	2
41	9219	7	30	10	6	23	4	19	7	3	4
42	8000	6	26	7	5	16	1	15	10	4	6
43	7001	4	43	17	2	26	2	24	18	2	16
44	4501	18	18	11	0	13	3	10	23	15	8
45	9401	14	41	15	1	18	4	14	35	10	25
46	3538	6	24	7	0	5	0	5	24	6	18
47	3399	9	19	7	0	10	4	6	18	5	13
48	10000	7	50	18	0	21	1	20	28	6	22
49	3401	2	19	5	1	5	1	4	15	1	14
50	4374	3	28	7	2	11	0	11	17	3	14
1	5801	3	34	11	1	16	0	16	19	3	16
3	10000	5	72	31	0	47	2	45	14	3	11
4	5804	5	35	15	2	27	3	24	10	1	9
5	8201	6	40	19	1	25	2	23	20	4	16
6	2201	2	13	3	2	3	0	3	10	2	8
7	1159	2	8	1	0	0	0	0	9	2	7
8	4623	4	26	9	2	10	0	10	18	4	14
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.9 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
10	8201	8	38	15	0	23	4	19	22	4	18
11	4601	2	19	3	0	11	0	11	9	2	7
12	3395	4	18	7	1	11	2	9	9	2	7
13	10000	3	70	27	4	48	3	45	16	0	16
14	10000	4	53	21	1	21	2	19	28	2	26
15	5797	4	23	7	3	12	2	10	11	2	9
16	9575	2	66	31	3	55	2	53	9	0	9

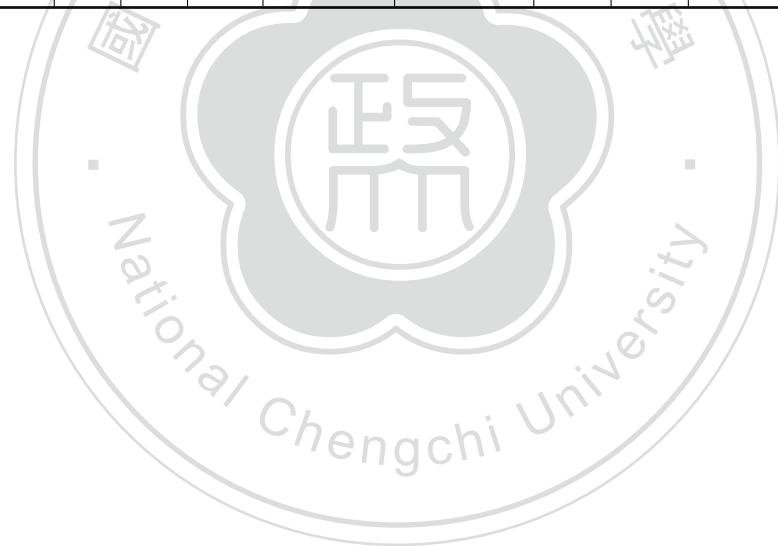


表 4.3.10 模擬六十次一隻做「萊維飛行」、九隻做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	4601	3	23	9	2	13	1	12	10	2	8
2	4601	1	28	11	0	14	1	13	15	0	15
3	5796	7	43	15	0	23	3	20	27	4	23
4	3192	1	17	3	2	7	0	7	8	1	7
5	2201	1	19	3	0	10	1	9	10	0	10
6	10000	6	63	29	3	48	4	44	8	2	6
7	10000	4	64	27	1	43	2	41	12	2	10
8	8201	9	48	19	0	27	5	22	30	4	26
9	5897	1	33	15	1	20	0	20	13	1	12
10	5799	1	49	15	0	30	1	29	20	0	20
11	8096	14	38	17	0	26	5	21	25	9	16
12	6896	13	38	19	1	35	6	29	14	7	7
13	2198	4	12	2	0	0	0	0	16	4	12
14	6999	11	41	19	0	26	5	21	26	6	20
15	4710	11	29	15	0	30	7	23	10	4	6
16	7179	1	47	19	0	34	0	34	13	1	12
17	2200	2	18	3	0	0	0	0	20	2	18

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.10 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
18	4769	1	28	11	0	16	0	16	13	1	12
19	10000	6	50	19	2	32	5	27	18	1	17
20	10000	7	55	26	2	40	5	35	13	2	11
21	5976	5	37	15	0	22	1	21	19	4	15
22	4596	1	36	11	0	18	1	17	19	0	19
23	8201	10	49	23	0	42	5	37	17	5	12
24	10000	4	86	39	0	58	4	54	12	0	12
25	8201	3	45	15	1	20	1	19	27	2	25
26	7001	7	29	11	3	13	2	11	19	3	16
27	5799	10	30	11	3	15	4	11	22	6	16
28	7001	1	40	11	4	15	0	15	22	1	21
29	7001	2	38	17	5	23	1	22	11	1	10
30	5600	1	30	7	4	17	1	16	9	0	9
31	5742	13	26	15	0	23	4	19	15	9	6
32	5999	1	41	15	0	24	0	24	17	1	16
33	3401	2	23	7	0	7	1	6	18	1	17
34	4601	3	31	11	0	20	2	18	14	1	13
35	2201	2	16	3	1	0	0	0	17	2	15
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.10 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
36	2196	2	17	3	0	0	0	0	19	2	17
37	2201	1	15	3	0	6	0	6	10	1	9
38	8248	23	40	23	2	43	15	28	17	8	9
39	5836	3	35	15	0	24	2	22	13	1	12
40	3399	1	23	7	0	7	0	7	17	1	16
41	4657	4	33	11	0	17	1	16	20	3	17
42	9401	5	36	9	8	19	2	17	13	1	12
43	5801	1	33	11	2	12	0	12	20	1	19
44	4732	3	31	13	0	24	2	22	10	1	9
45	7001	3	40	15	0	18	1	17	25	2	23
46	10000	7	70	31	1	41	3	38	23	4	19
47	7000	4	41	15	0	24	3	21	21	1	20
48	4596	1	23	7	3	9	0	9	12	1	11
49	6799	7	26	7	2	13	3	10	17	4	13
50	3443	5	23	11	0	17	2	15	10	3	7
51	8200	5	43	15	4	19	2	17	25	3	22
52	8201	4	58	23	0	39	2	37	23	2	21
53	8201	10	40	17	5	31	4	27	14	6	8
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.10 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
54	4601	2	35	11	0	16	1	15	21	1	20
55	3399	2	22	7	0	10	1	9	14	1	13
56	2201	3	13	3	0	5	1	4	10	2	8
57	8201	3	44	17	3	34	3	31	9	0	9
58	7001	7	40	15	4	24	1	23	18	6	12
59	8214	15	51	23	2	43	10	33	21	5	16
60	4601	2	36	11	0	19	0	19	19	2	17



表 4.3.11 模擬六十次十隻都做「布朗運動」的結果

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
1	4644	0	34	11	1	19	0	19	14	0	14
2	10000	0	88	31	0	51	0	51	21	0	21
3	4777	0	37	11	0	15	0	15	21	0	21
4	4601	0	24	6	1	13	0	13	9	0	9
5	8200	0	40	11	1	17	0	17	22	0	22
6	5794	0	39	9	0	6	0	6	33	0	33
7	4595	0	37	7	0	8	0	8	28	0	28
8	2289	0	16	3	1	6	0	6	8	0	8
9	10000	0	42	10	0	25	0	25	13	0	13
10	7001	0	30	5	4	9	0	9	16	0	16
11	2244	0	16	3	0	3	0	3	12	0	12
12	6999	0	52	15	0	26	0	26	26	0	26
13	4601	0	28	7	0	15	0	15	13	0	13
14	5911	0	39	11	0	19	0	19	20	0	20
15	4394	0	22	3	2	5	0	5	14	0	14
16	5796	0	50	11	0	26	0	26	24	0	24
17	4785	0	33	11	1	15	0	15	17	0	17

Continued on next page(繼續下一頁)

表 4.3.11 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
18	10000	0	59	20	1	31	0	31	24	0	24
19	5889	0	36	11	0	17	0	17	19	0	19
20	2199	0	20	3	0	0	0	0	20	0	20
21	7001	0	46	11	0	13	0	13	33	0	33
22	4668	0	39	11	1	24	0	24	14	0	14
23	5798	0	35	11	1	18	0	18	16	0	16
24	4601	0	29	7	4	4	0	4	21	0	21
25	6793	0	45	13	2	24	0	24	18	0	18
26	2201	0	19	3	0	0	0	0	19	0	19
27	6999	0	46	15	2	23	0	23	21	0	21
28	2258	0	16	3	0	3	0	3	13	0	13
29	9399	0	73	23	1	49	0	49	23	0	23
30	3399	0	26	7	0	10	0	10	16	0	16
31	4601	0	33	7	2	6	0	6	25	0	25
32	5889	0	36	11	1	15	0	15	20	0	20
33	3400	0	25	7	0	9	0	9	16	0	16
34	3542	0	30	7	0	2	0	2	27	0	27
35	3403	0	28	7	1	18	0	18	9	0	9
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.11 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
36	10000	0	90	27	0	53	0	53	17	0	17
37	3400	0	22	7	1	9	0	9	12	0	12
38	2260	0	16	3	0	6	0	6	10	0	10
39	6800	0	38	7	4	10	0	10	23	0	23
40	3401	0	28	7	0	9	0	9	19	0	19
41	2201	0	20	3	0	0	0	0	20	0	20
42	5801	0	39	11	1	15	0	15	23	0	23
43	3400	0	26	7	0	6	0	6	20	0	20
44	2201	0	16	3	0	6	0	6	10	0	10
45	3400	0	30	7	0	10	0	10	20	0	20
46	10000	0	57	13	1	18	0	18	34	0	34
47	2264	0	15	3	3	4	0	4	8	0	8
48	6999	0	56	19	0	40	0	40	16	0	16
49	5923	0	44	15	0	24	0	24	20	0	20
50	7118	0	56	19	0	31	0	31	25	0	25
51	4737	0	37	11	0	18	0	18	19	0	19
52	6800	0	32	9	4	19	0	19	8	0	8
53	2257	0	16	3	0	6	0	6	10	0	10
Continued on next page(繼續下一頁)											

表 4.3.11 – continued from previous page(延續前頁)

	S	IL	IB	FC	Traped	Natural	NL	NB	Starve	SL	SB
54	10000	0	73	23	2	33	0	33	34	0	34
55	7001	0	36	7	1	17	0	17	17	0	17
56	7002	0	36	13	7	21	0	21	7	0	7
57	4597	0	32	7	1	4	0	4	27	0	27
58	4777	0	34	11	0	10	0	10	24	0	24
59	4595	0	37	11	0	18	0	18	19	0	19
60	2201	0	14	1	7	3	0	3	3	0	3



在這十一種不同比例總計 660 次模擬的實驗中，我們提取出以下幾項重要的數據做為指標。

表 4.3.12 各項數據統整一

菜：布	全滅次數	平均步數	總更換食物次數	平均換一次食物的步數
10:0	59	2128	149	856.7
9:1	60	2301	178	775.7
8:2	58	3166	294	646.1
7:3	59	3398	294	693.4
6:4	55	3994	419	571.9
5:5	53	4901	539	545.6
4:6	54	5390	652	496.0
3:7	48	6696	898	447.4
2:8	48	6477	894	434.7
1:9	54	6046	830	437.1
0:10	54	5297	589	539.6

表 4.3.13 各項數據統整二

菜：布	總自然死亡數	總餓死數	自然死與餓死的比值
10:0	228	732	0.311
9:1	256	742	0.345
8:2	450	843	0.534
7:3	521	809	0.644
6:4	667	915	0.729
5:5	815	982	0.830
4:6	1018	1063	0.958
3:7	1417	1022	1.386
2:8	1403	976	1.438
1:9	1305	1000	1.305
0:10	934	1110	0.841

第五章 結論

從模擬實驗數據中，我們得到以下三點結論：

- 首先由表 4.3.12 中可以發現存活率最高的比例是落在 2:8 與 3:7，在 60 次的模擬當中，有 12 次是在一萬步之前沒有被全滅的，而且平均步數約在 6500 步，在十一組實驗中表現是最為理想的兩組。存活率也隨著做萊維飛行的果蠅隻數變多而降低，其中 0:10、1:9 與 4:6 的全滅次數相同。最差的比例落在 9:1 和 10:0，平均步數約 2200 步。從此結果我們推論出，當少部分做萊維飛行的果蠅與大多數做布朗運動的果蠅一起覓食時，整個群體的存活率是最高的。過多的萊維飛行或是沒有做萊維飛行的果蠅群體存活率是比較低的。
- 由表 4.3.12 中「平均換一次食物的步數」，此項數據可以理解為果蠅群體搜尋食物的效率，步數少也就意味著花費較少的時間就能找到食物，而表現最好的比例也是落在 2:8，帶著此比例不僅存活率高，相對的搜尋食物的效率也高。
- 由表 4.3.13 中「自然死亡與餓死的比值」，此項數據一樣可以理解為果蠅群體搜尋食物的能力，自然死亡的比例高，表示大多數的果蠅都能夠吃得到食物，平安的走完一生，而餓死的比例高則代表大多數果蠅吃不到食物，在搜尋的路途中因為體力不支而陣亡。此項數據表現最好的比例依舊落在 2:8，比值高達 1.438，第二名是 3:7，第三名是 1:9，其他比例也隨著做萊維飛行的果蠅隻數變多而降低，而 0:10 的表現介於 4:6 與 5:5 之間。

總結以上三點，做萊維飛行的果蠅與做布朗運動的果蠅比例為 2:8 與 3:7 時，整體的存活率與搜尋食物的效率都表現得最好。也說明了在大自然當中，為什麼做萊維飛行的果蠅雖然數量很少，但卻一直沒有被淘汰的原因，因為它為整個果蠅群體帶來了很大的正面幫助，無論是在覓食或是繁衍後代，它的存在都是有正面意義的。

附錄 A python code

列表 A.1 果蠅飛行模擬

```
#!/usr/bin/env python
# coding: utf-8
# In[1]:
import random
import math
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
from time import sleep
from tqdm import tqdm, trange
from collections import Counter
import seaborn as sns
# In[2]:
#障礙物
k = 200 #計算果蠅附近的氣味濃度半徑、障礙物的厚度
e = 8000
blockx = [[0,0],[0,2*e],[2*e,2*e],[2*e,0], #邊界
           [e/2,e/2],[e/2,e/4],[e/4,e/4],[e/4,e/2+k],[e/2+k,e/2+k],
           #障礙1
           [e/2,e/2],[e/2,e/4],[e/4,e/4],[e/4,e/2+k],[e/2+k,e/2+k],#障礙2
           [3*e/4,3*e/4],[6000,7000],[7000,7000],[7000,8000],[8000,8000],
           [8000,9000],[9000,9000],[9000,3*e/4],#障礙3
           [11000,11000],[11000,11000+k],[11000+k,11000+k],#障礙4
```

```

[13000,13000],[13000,13000+k],[13000+k,13000+k]]#障礙5

blocky = [[0,e],[e,e],[e,0],[0,0], #邊界
          [e,3*e/4],[3*e/4,3*e/4],[3*e/4,3*e/4-k],
          [3*e/4-k,3*e/4-k],[3*e/4-k,e], #障礙1
          [0,e/4],[e/4,e/4],[e/4,e/4+k],[e/4+k,e/4+k],[e/4+k,0],#障礙2
          [e/4,3*e/4],[3*e/4,3*e/4],[6000,4500],[4500,4500],[4500,6000],
          [6000,6000],[3*e/4,e/4],[e/4,e/4],#障礙3
          [e,3000],[3000,3000],[3000,e],#障礙4
          [0,5000],[5000,5000],[5000,0]]#障礙5

# In[3]:
#初始圖

with plt.rc_context({'axes.edgecolor':'orange', 'xtick.color':'red',
                     'ytick.color':'red', 'figure.facecolor':'white'}):
    plt.figure(figsize=(20,10))#圖片大小
    for i in range(len(blockx)):#障礙物
        plt.plot(blockx[i],blocky[i],c='g')
    plt.savefig('./初始圖.jpg')

# In[4]:
#食物的氣味擴散

foodlocation = [[2000,1000],[10000,4000],[14000,3000],[5000,4000]]
for u in range(len(foodlocation)):#生成氣味圖數量

    #參數設置
    food = foodlocation[u]
    air = 100 #起始空氣粒子個數
    airx = [food[0] for _ in range(air)] #每個顆粒的起始x位置
    airy = [food[1] for _ in range(air)] #每個顆粒的起始y位置
    totalx = [] #最終累計每個粒子x位置
    totaly = [] #最終累計每個粒子y位置
    ######
    for l in tqdm(range(10000)): #步數
        sleep(0.01)
        for h in range(air):#每顆粒子走一步

```

```

s = np.random.randn(1)[0]*100 #步長
theta = math.radians(random.uniform(0,360)) #角度
c = [s*np.cos(theta),s*np.sin(theta)] #移動向量
nx = airx[h] + c[0] #新x座標
ny = airy[h] + c[1] #新y座標
r = 0
while r < len(blockx) :
    for i in range(len(blockx)):#判斷是否跨過障礙物
        s1 = np.sign((c[0]*(blocky[i][0]-airy[h]))-(c[1]*(blockx[i][0]-airx[h])))
        s2 = np.sign((c[0]*(blocky[i][1]-airy[h]))-(c[1]*(blockx[i][1]-airx[h])))
        s3 =
            np.sign((blockx[i][0]-airx[h])*(blocky[i][1]-airy[h])-
((blocky[i][0]-airy[h])*(blockx[i][1]-airx[h])))
        s4 = np.sign((blockx[i][0]-nx)*(blocky[i][1]-ny)-
((blocky[i][0]-ny)*(blockx[i][1]-nx)))
        if (s1 != s2) and (s3 != s4): #有跨過障礙物
            if blockx[i][0] == blockx[i][1]:#障礙物是垂直的
                nx = 2*blockx[i][0]-nx #鏡射後x座標
                ny = ny #y座標不變
                c[0] = nx - airx[h] #鏡射後的x移動向量
                c[1] = ny - airy[h] #鏡射後的y移動向量
            elif blocky[i][0] == blocky[i][1] : #障礙物是水平的
                nx = nx #x座標不變
                ny = 2*blocky[i][0]-ny #鏡射後y座標
                c[0] = nx - airx[h] #鏡射後的x移動向量
                c[1] = ny - airy[h] #鏡射後的y移動向量
            else :
                r+=1 #每檢查過一個障礙物就加一
                airx[h] = nx #紀錄新的x座標
                airy[h] = ny #紀錄新的y座標
if l % 100 == 0 :#每20步紀錄一次

```

```

        totalx = totalx + airx
        totaly = totaly + airy

#處存數據
a = np.array(totalx)
np.save('airtotalx'+str(u)+'.npy',a)
a = np.array(totaly)
np.save('airtotaly'+str(u)+'.npy',a)

with plt.rc_context({'axes.edgecolor':'orange',
                     'xtick.color':'red',
                     'ytick.color':'red', 'figure.facecolor':'white'}):
    plt.figure(figsize=(20,10))#圖片大小
    for i in range(len(blockx)):#障礙物
        plt.plot(blockx[i],blocky[i],c='g')
    plt.scatter(totalx,totaly,s=10,c='b',zorder=1,alpha=0.1)
#最終累計每個粒子位置
    plt.gcf().gca().add_artist(plt.Circle((food[0]
, food[1]),250,color='y',zorder=2,alpha=0.8)) #食物範圍
    plt.text(food[0],food[1],'food',fontsize=10
,verticalalignment='center',horizontalalignment='center')#食物文字
    plt.savefig('../氣味圖'+str(u)+'.jpg')

# In[5]:
#匯入氣味點
foodlocation = [[2000,1000],[10000,4000],[14000,3000],[5000,4000]]
point=[]
for l in range(len(foodlocation)):
    totalx = np.load('airtotalx'+str(l)+'.npy').tolist()
    totaly = np.load('airtotaly'+str(l)+'.npy').tolist()
    point.append([[ 0 for i in range(32)] for i in range(16)])
    for i in range(16):

```

```

for j in range(32):
    dot = 0
    for k in range(len(totalx)):
        if (15-i)*500 < totaly[k] < (16-i)*500
        and j*500 < totalx[k] < 500*(j+1):
            dot+=1
    point[1][i][j] = dot

# In[6]:
#氣味分布圖

for i in range(0,4) :
    f, ax = plt.subplots(figsize=(9, 6))
    sns.heatmap(point[i], annot=True, fmt="d", linewidths=.5, ax=ax)

# In[7]:
#參數設置

parameter = [1800,2000,900,1000,1200] #萊維飛行自然死、
布朗運動自然死、萊維飛行餓死、布朗運動餓死、交配的時間

maxgen = 10000 #疊代次數
sizepop = 10 #果蠅數量
foodupper = 6 #食物上限
f = 0 #萊維飛行的果蠅數量
si = 30 #模擬次數
th = 10 #氣味門檻

#數據紀錄

patternname = './0隻萊維飛行10布朗運動'
writer = pd.ExcelWriter('0隻萊維飛行10隻布朗運動數據紀錄.xlsx',
                       engine='xlsxwriter')
record=[]

df = pd.DataFrame(record, columns = ['S','IL','IB','FL','FB','FD',
                                     'FC','Traped','TL','TB','Natural','NL','NB','Starve','SL','SB'])

```

```

#levy
beta = 3/2
alpha_u = (math.gamma(1+beta)*math.sin(math.pi*beta/2)
/(math.gamma(((1+beta)/2)*beta*2**((beta-1)/2))))** (1/beta)
alpha_v = 1

#飛行模擬
for m in range(si):#模擬次數
    mainpoint = point[0].copy()#使用第一個氣味圖
    #每隻果蠅的飛行狀態,0萊維飛行;1布朗運動;2死亡;0吃飽變3;1吃飽變4
    fruitfly = [ 0 for _ in range(f)]+[ 1 for _ in range(sizepop-f) ]
    #起始位置
    step = []#計算步數
    start = [2000,7000]
    food = foodlocation[0].copy()
    trap = [7500,5000] #捕蚊燈
    initiallist = fruitfly.copy() #所有果蠅的初始狀態
    trapelist = [] #被捕蚊燈補的果蠅狀態
    traped = 0 #被捕捉的果蠅數
    starve = 0 #被餓死的果蠅數
    SL = 0 #餓死的萊維飛行果蠅數
    SB = 0 #餓死的布朗運動果蠅數
    natural = 0 #自然死的果蠅數
    NL = 0 #自然死的萊維飛行果蠅數
    NB = 0 #自然死的布朗運動果蠅數
    number = [0 for _ in range(sizepop)]#吃飽到餓死計步器
    foodnumber = 0 #食物標號
    foodexchange = 0 #食物交換次數
    foodexchangestep = [] #食物交換時的步數
    #每一隻果蠅的位置
    flyx = [start[0] for _ in range(sizepop)]
    flyy = [start[1] for _ in range(sizepop)]

```

```

#味道濃度
smell = [0 for _ in range(sizepop)]
#味道最佳座標
bestx = [start[0]]
besty = [start[1]]
#紀錄每一隻的路徑/[[第一隻第一步,第一隻第二步,...],
pathx = [[] for _ in range(sizepop)]
pathy = [[] for _ in range(sizepop)]
for i in range(sizepop):
    pathx[i].append(flyx[i])
    pathy[i].append(flyy[i])

bestsmell = 0 #起始的最佳氣味位置的顆粒數

stop = 0 #接近食物時會變1
for l in tqdm(range(maxgen)):#步數
    sleep(0.01)
    h = 0 #h表示果蠅的編號，從0開始
    for p in fruitfly : #每一隻果蠅的飛行
        if p == 0 or p == 3 : #果蠅做萊維飛行
            u=random.normalvariate(0,alpha_u)
            v=random.normalvariate(0,alpha_v)
            s = u/ (abs(v))**(1/beta) #步長
            s = 100*s
            if abs(s) > 800 :#設上界
                s = np.sign(800)

            theta = math.radians(random.uniform(0,360)) #角度
            c = [s*np.cos(theta),s*np.sin(theta)] #移動向量
        elif p == 1 or p == 4: #果蠅做布朗運動
            s = np.random.randn(2)*200
            s = s.tolist()
            if abs(s[0]) > 400 :#設上界
                s[0] = np.sign(s[0])*400

```

```

if abs(s[1]) > 400 :#設上界
    s[1] = np.sign(s[1])*400
c = [s[0],s[1]]
else : #已死亡或到達食物
    c = [0,0]
nx = flyx[h] + c[0]
ny = flyy[h] + c[1]

r = 0
while r < len(blockx) :#判斷是否跨過障礙物
    for i in range(len(blockx)):
        s1 = np.sign((c[0]*(blocky[i][0]-flyy[h]))-
(c[1]*(blockx[i][0]-flyx[h])))
        s2 = np.sign((c[0]*(blocky[i][1]-flyy[h]))-
(c[1]*(blockx[i][1]-flyx[h])))
        s3 =
            np.sign((blockx[i][0]-flyx[h])*(blocky[i][1]-flyy[h])-
((blocky[i][0]-flyy[h])*(blockx[i][1]-flyx[h])))
        s4 = np.sign((blockx[i][0]-nx)*(blocky[i][1]-ny)-
((blocky[i][0]-ny)*(blockx[i][1]-nx)))
        if (s1 != s2) and (s3 != s4): #有跨過障礙物
            if blockx[i][0] == blockx[i][1]:#障礙物是垂直的
                nx = 2*blockx[i][0]-nx #鏡射後x座標
                ny = ny #y座標不變
                c[0] = nx - flyx[h] #鏡射後的x移動向量
                c[1] = ny - flyy[h] #鏡射後的y移動向量
            elif blocky[i][0] == blocky[i][1] : #障礙物是水平的
                nx = nx #x座標不變
                ny = 2*blocky[i][0]-ny #鏡射後y座標
                c[0] = nx - flyx[h] #鏡射後的x移動向量
                c[1] = ny - flyy[h] #鏡射後的y移動向量
            else :
                r+=1 #每檢查過一個障礙物就加一

```

```

flyx[h] = nx #紀錄新的x座標
flyy[h] = ny #紀錄新的y座標

#周圍的粒子數
if fruitfly[h] != 2:
    smell[h] =
        mainpoint[int(16-flyy[h]/500)][int(flyx[h]/500)]
h+=1

#紀錄每一隻的路徑
for i in range(len(fruitfly)):
    if fruitfly[i] != 2:#沒死才紀錄
        pathx[i].append(flyx[i])
        pathy[i].append(flyy[i])
        number[i] += 1

#取在最佳氣味位置的果蠅編號 = b
b = smell.index(max(smell))

#判定是否聚集
if smell[b] > bestsmell + th : #比原先多th顆粒
    bestsmell = smell[b]
    bestsmell_index = b

for i in range(len(fruitfly)): #所有果蠅聚集
    if fruitfly[i] != 2 :#沒死才紀錄
        flyx[i] = flyx[bestsmell_index]
        flyy[i] = flyy[bestsmell_index]

bestx.append(flyx[bestsmell_index])
besty.append(flyy[bestsmell_index])

for i in range(len(fruitfly)):
```

```

if fruitfly[i] != 2 :#沒死才紀錄
    pathx[i].append(flyx[i])
    pathy[i].append(flyy[i])
    number[i] += 1

#進入捕蚊燈死亡
for i in range(len(fruitfly)):
    if fruitfly[i] != 2 and
        ((flyx[i]-trap[0])**2+(flyy[i]-trap[1])**2) < 250**2 :
        trapelist.append(fruitfly[i])
        fruitfly[i] = 2
        smell[i] = 0
        traped+=1

#每隻萊維飛行果蠅死亡(老死)
for i in range(len(fruitfly)):
    if (fruitfly[i] in {0,3}) and len(pathx[i]) >= parameter[0] :
        fruitfly[i] = 2
        smell[i] = 0
        natural+=1
        NL+=1

#每隻布朗運動果蠅死亡(老死)
for i in range(len(fruitfly)):
    if (fruitfly[i] in {1,4}) and len(pathx[i]) >= parameter[1] :
        fruitfly[i] = 2
        smell[i] = 0
        natural+=1
        NB+=1

#每隻萊維飛行果蠅死亡(餓死)
for i in range(len(fruitfly)):
    if fruitfly[i] == 0 :

```

```

if number[i] >= parameter[2] :
    fruitfly[i] = 2
    smell[i] = 0
    starve+=1
    SL+=1

#每隻布朗運動果蠅死亡(餓死)
for i in range(len(fruitfly)):
    if fruitfly[i] == 1 :
        if number[i] >= parameter[3] :
            fruitfly[i] = 2
            smell[i] = 0
            starve+=1
            SB+=1

#交配生下一代
if l % parameter[4] == 0 and l != 0 :
    nfruitfly = fruitfly.copy()
    for i in range(len(fruitfly)):
        if fruitfly[i] != 2 :#沒死才交配
            mate = [0 for _ in range(len(fruitfly))]
            for w in range(len(fruitfly)):
                mate[w] =
                    ((flyx[i]-flyx[w])**2+(flyy[i]-flyy[w])**2)

#第i隻果蠅與其他果蠅的距離
if fruitfly[w] == 2 :#與已死亡的果蠅距離定為0
    mate[w] = 0
    if mate[w] == 0 :
        mate[w] = 9999999
if fruitfly[i] == fruitfly[mate.index(min(mate)) ]
    :#同飛行模式交配
    if fruitfly[i] == 0 or fruitfly[i] == 3:
        nfruitfly.append(0)

```

```

        initiallist.append(0)

    elif fruitfly[i] == 1 or fruitfly[i] == 4:
        nfruitfly.append(1)
        initiallist.append(1)

    elif abs(fruitfly[i]-fruitfly[mate.index(min(mate))]) == 3 :#同飛行模式交配
        if fruitfly[i] == 0 or fruitfly[i] == 3:
            nfruitfly.append(0)
            initiallist.append(0)

        elif fruitfly[i] == 1 or fruitfly[i] == 4:
            nfruitfly.append(1)
            initiallist.append(1)

        elif fruitfly[mate.index(min(mate))] == 2 :
            nfruitfly.append(fruitfly[i])
            initiallist.append(fruitfly[i])
        else :
            rc = random.choice([0,1])
            nfruitfly.append(rc)
            initiallist.append(rc)

    pathx.append([flyx[i]])
    pathy.append([flyy[i]])
    flyx.append(flyx[i])
    flyy.append(flyy[i])
    smell.append(0)
    number.append(0)

else :
    continue

fruitfly = nfruitfly.copy()

#靠近食物的範圍內直接飛向食物

for i in range(len(fruitfly)):
    if fruitfly[i] == 0 or fruitfly[i] == 1 :#沒吃飽的才算
        if ((flyx[i]-food[0])**2+(flyy[i]-food[1])**2) < 400**2 :

```

```

        if fruitfly[i] == 0 :
            fruitfly[i] = 3
            number[i] = 0

        elif fruitfly[i] == 1 :
            fruitfly[i] = 4
            number[i] = 0

#食物吃完

if (fruitfly.count(3)+fruitfly.count(4)) >= foodupper :
    foodexchange+=1
    foodexchangestep.append(1)

bestsmell = 0 #最佳氣味位置的顆粒數歸零
smell = [0 for _ in range(len(fruitfly))]#每隻味道濃度歸零

#更換食物

for i in range(len(point)-1) :
    if foodnumber == i :
        mainpoint = point[i+1].copy()
        food = foodlocation[i+1].copy()
        foodnumber = i+1
        break
    elif foodnumber == (len(point)-1) :
        mainpoint = point[0].copy()
        food = foodlocation[0].copy()
        foodnumber = 0
        break

for i in range(len(fruitfly)):#吃飽的回到覓食狀態
    if fruitfly[i] == 3 :
        fruitfly[i] = 0
    elif fruitfly[i] == 4 :
        fruitfly[i] = 1

if len(set(fruitfly)) == 1 and fruitfly[0] == 2 : #全死光停止
    t = 1
    step.append(t)
    break

```

```

if l == maxgen-1 : #跑完停止
    t = 1
    step.append(t)
    break

#剩下一隻也結束
d = 0

for i in range(len(fruitfly)):
    remain = fruitfly.copy()
    del remain[i]
    if list(set(remain))[0] == 2 and len(set(remain)) == 1:
        d = 1
    if d == 1:
        t = 1
        step.append(t)
        break

IL = initialist.count(0) + initialist.count(3)
#每隻果蠅最初狀態(萊維飛行)

IB = initialist.count(1) + initialist.count(4)
#每隻果蠅最初狀態(布朗運動)

FL = fruitfly.count(0) + fruitfly.count(3) #每隻果蠅最終狀態(萊維飛行)
FB = fruitfly.count(1) + fruitfly.count(4) #每隻果蠅最終狀態(布朗運動)
FD = fruitfly.count(2) #每隻果蠅最終狀態(死亡)

TL = trapedList.count(0) + trapedList.count(3)
#被捕果蠅的狀態(萊維飛行)

TB = trapedList.count(1) + trapedList.count(4)
#被捕果蠅的狀態(布朗運動)

df.loc[m+1]=[t+1,IL,IB,FL,FB,FD,foodexchange
,traped,TL,TB,natural,NL,NB,starve,SL,SB]

#作圖

colormap = plt.cm.gist_ncar #多顏色
with plt.rc_context({'axes.edgecolor':'orange', 'xtick.color':'red',

```

```

        , 'ytick.color':'green', 'figure.facecolor':'white'}}):
plt.figure(figsize=(20,10))
for i in range(len(blockx)):#障礙物
    plt.plot(blockx[i],blocky[i],c='g')
for i in range(len(foodlocation)):#食物範圍
    plt.gcf().gca().add_artist(plt.Circle((foodlocation[i][0]
,foodlocation[i][1]),400,color='y',zorder=2,alpha=0.6))
for i in range(len(foodlocation)):#食物文字
    plt.text(foodlocation[i][0],foodlocation[i][1], 'food'+str(i)
,fontsize=10,verticalalignment='center',horizontalalignment='center')
for i in range(0,len(fruitfly)):#果蠅路徑
    plt.plot(pathx[i],pathy[i],zorder=1,alpha=0.4)
plt.plot(bestx,besty, c='r',zorder=2,alpha=0.7)#最佳氣味路徑
plt.gcf().gca().add_artist(plt.Circle((start[0],start[1])
,250,color='g',zorder=2,alpha=0.8)) #起始位置
for i in range(0,len(fruitfly)):#果蠅的最終位置
    plt.scatter(pathx[i][-1], pathy[i][-1], s=50 , zorder=3)
plt.gcf().gca().add_artist(plt.Circle((trap[0],trap[1])
,250,color='r',zorder=2,alpha=0.6))#捕蚊燈範圍
plt.text(trap[0],trap[1],'trap',fontsize=10,verticalalignment='center'
,horizontalalignment='center')#捕蚊燈文字
plt.text(start[0],start[1],
'start',fontsize=10,verticalalignment='center'
,horizontalalignment='center')#起點文字
plt.text(7000, 4000, "S=" + str(t+1),fontsize=10) #顯示步數
plt.text(7000, 3800, "IL="+str(IL)+" IB="+str(IB)
,fontsize=10) #顯示所有果蠅初始狀態
plt.text(7000, 3600, "FL="+str(FL)+" FB="+str(FB)+" FD="+str(FD)
,fontsize=10) #顯示所有果蠅最終狀態
plt.text(7000, 3400,"FC=" + str(foodexchange) ,fontsize=10)
#顯示食物交換次數
#plt.text(200, -1100,"f.c.s=" + str(foodexchangestep)
,fontsize=10) #顯示食物交換的步數

```

```
plt.text(7000, 3200,"Traped=" + str(traped) ,fontsize=10)
        #顯示被捕捉的果蠅數

plt.text(7000, 3020,"TL="+str(TL)+" TB="+str(TB) ,fontsize=10)
        #顯示被捕蚊燈補的果蠅狀態

plt.text(7000, 2800,"Natural=" + str(natural) ,fontsize=10)
        #顯示被餓死的果蠅數

plt.text(7000, 2600,"Starve=" + str(starve) ,fontsize=10)
        #顯示自然死的果蠅數

plt.savefig(patternname+str(m+1)+'.jpg')
```

```
df.to_excel(writer)
writer.save()
```



參考文獻

- [1] 王庆喜，郭晓波. 基于莱维飞行的粒子群优化算法 [J], 计算机应用研究 , 2016,33 (9:) :2588-2591
- [2] 朱晓恩等，基于 Levy flight 的特征选择算法 [J], 浙江大学学报（工学版）, 2013,47 (4) : 638-643
- [3] 郭德龙, 杨楠, 周永权. 一种基于 lévy 飞行轨迹的果蝇优化算法 [J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(2): 304-310.
- [4] 黃文璋 (民國 81 年), 布朗運動簡介, 數學傳播, 第十六卷第四期。
- [5] 潘文超, 果蠅最佳化演算法. 台北: 滄海書局,2011.
- [6] Abe MS, Shimada M. 2015 Lévy walks suboptimal under predation risk. PLoS Comput Biol 11, e1004601. (doi:10.1371/journal.pcbi.1004601)
- [7] Humphries NE, Queiroz N, Dyer JRM, Pade NG, Musyl MK, Schaefer KM, Fuller DW, Brunnenschweiler JM, Doyle TK, Houghton JDR. Environmental context explains Lévy and Brownian movement patterns of marine predators[J]. Nature, 2010,465(7301): 1066-1069
- [8] Reynolds AM, Frye MA (2007) Free-flight odor tracking in *Drosophila* is consistent with an optimal intermittent scale-free search. Plos ONE 2: e354.
- [9] Shlesinger MF, Klafter J. Lévy walks versus Lévy flights. In: Stanley HE, Ostrowski N, editors. Growth and Form. Amsterdam: Martinus Nijhof Publishers; 1986. pp. 279–283.
- [10] Sims DW, Humphries NE, Bradford RW, Bruce BD (2012) Lévy flight and Brownian search patterns of a free-ranging predator reflect different prey field characteristics. J Anim Ecol 81: 432–442. 10.1111/j.1365-2656.2011.01914.x

- [11] Viswanathan GM, Buldyrev SV, Havlin S, da Luz MGE, Raposo EP, et al. (1999)
Optimizing the success of random searches. *Nature* 401: 911–914.

