



國立中山大學 海洋環境及工程學系研究所

碩士論文

運用指標與資料採礦技術分析橈足類與纖毛蟲互動型態

Analysis of interactive patterns between copepods and ciliates

using indicators and data mining techniques

研究生：許智勇撰

指導教授：張揚祺

中華民國 九十七年 七月

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校海洋環境及工程學系碩士班

研究生許智勇（學號：M945040018）所提論文

運用指標與資料採礦技術分析橈足類與纖毛蟲互動型態  
Analysis of interactive patterns between copepods and  
ciliates using indicators and data mining techniques

經本委員會審查並舉行口試，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

莫以善

李孟璵

黃將修

張揚祺

指導教授(可免) 張揚祺

系主任/所長(可免) 張揚祺

## 摘要

雖然浮游動物對人類而言不能直接利用，但牠們是許多經濟性魚類及水產的重要食物，浮游動物的互動不僅影響全球的碳固定，也直接影響漁業的產量，所以了解浮游動物互動是一項重要的議題。本研究探討的橈足類與纖毛蟲均為構成海洋食物網的重要聯繫角色，分析兩者之間掠食者-獵物的互動能幫助我們更了解海洋生產力。

本研究的目的是研究橈足類與纖毛蟲在未受掠食者-獵物干擾的環境中與掠食者-獵物互動環境中的游泳行為之差異，我們運用五種運動型指標(NGDR、轉彎程度、擴散係數、動能和碎形維度)進行量化分析而得到其游泳特徵。橈足類未受干擾環境下軌跡特徵呈現較扭曲、轉彎程度大、擴散行為多與動能極低等現象；在互動環境中的特徵則相反。纖毛蟲在未受干擾環境下特徵現象與橈足類類似，唯轉彎程度較小；在互動環境中的特徵與橈足類相似，僅在轉彎與擴散行為有差異。除運動型指標外，本研究發展一種新的編碼概念嵌入時空資訊於原來的橈足類與纖毛蟲的互動行為資料中，並搭配資料採礦技術對編碼資料進行探勘分析，將更容易了解關於橈足類與纖毛蟲所在的空間區域與互動行為之間的關係。

關鍵字：橈足類、纖毛蟲、掠食者-獵物互動、運動型指標、編碼、資料採礦



## Abstract

Even zooplankton can not be utilized directly by human being; it is an important food source for numerous economical fishes. Zooplankton's predator-prey interactions can affect not only global carbon fixation, but also fisheries yields directly. Copepods and ciliates are the targets of the current study, which act as critical links between classical diatom-copepod-fish webs and microbial food webs. Analyzing their predator-prey interactions can help us understand more about marine food production.

The objective of this study is to investigate the differences in swimming behavior of copepods and ciliates under two environments, which are disturbances and no disturbances of predator-prey. We use five locomotive indicators (NGDR, turning rate, diffusion coefficient, kinetic energy and fractal dimension) to quantify swimming patterns. The trajectories of copepods in the undisturbed situation show circuitous, larger turning angle, and more diffusive behavior, which associate with a lower kinetic energy. The patterns of copepod movement with the presence of prey (ciliates) are contrary to the previous situation. The patterns of ciliates in the undisturbed situation are similar to those of copepods in undisturbed situation, except smaller turning angles. The trajectories of ciliates in terms of the turning and diffusive movement when predators (copepods) show up are different from those of copepods when preys (ciliates) are present. In addition to indicators, this study develops a new encoding scheme for accommodating the spatial-temporal information embedded in the original data. By analyzing the encoded data through some data mining techniques, the predator-prey interactive behaviors in the spatial scale can be easily perceived.

Keywords: Copepod, Ciliate, Predator-prey interaction, Locomotion indicators, Encoding scheme, Data mining



## 目錄

第一章 前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究流程.....	3
1.4 研究限制.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 橈足類的相關研究.....	5
2.2 運動型指標的相關研究.....	6
2.3 序列編碼及資料採礦技術.....	14
第三章 研究方法.....	17
3.1 資料處理.....	17
3.2 運動型指標.....	20
3.3 攝食行為的互動軌跡序列資料編碼.....	28
3.4 資料採礦技術.....	33
第四章 研究成果.....	37
4.1 指標分析.....	37
4.2 資料採礦分析.....	51
4.3 成果討論.....	55
第五章 結論與建議.....	58
5.1 結論.....	58
5.2 建議.....	59
參考文獻.....	61
附錄一.....	67
附錄二.....	71

## 圖目錄

圖 1.1 典型的海洋食物網 .....	2
圖 1.2 研究流程 .....	3
圖 1.3 3D軌跡與 2D投影 .....	4
圖 3.1 資料處理流程 .....	18
圖 3.2 有機體軌跡示意 .....	21
圖 3.3 轉彎程度示意 .....	22
圖 3.4 位移與總路徑的LOG-LOG圖 .....	24
圖 3.5 橈足類和纖毛蟲互動軌跡的序列編碼生成 .....	29
圖 3.6 空間區域示意圖 .....	30
圖 3.7 時間區段示意圖 .....	30
圖 3.8 互動軌跡編碼 .....	32
圖 3.9 橈足類與纖毛蟲相對關係示意 .....	32
圖 3.10 決策樹結構圖 .....	35
圖 4.1 橈足類與纖毛蟲 2D游泳軌跡 .....	38
圖 4.2 橈足類 2D游泳軌跡之四種類型 .....	38
圖 4.3 橈足類與纖毛蟲比較流程 .....	40
圖 4.4 橈足類的NGDR百分比分配圖 .....	41
圖 4.5 纖毛蟲的NGDR百分比分配圖 .....	42
圖 4.6 橈足類的轉彎程度百分比分配圖 .....	43
圖 4.7 橈足類的轉彎角度百分比分配圖 .....	43
圖 4.8 纖毛蟲的轉彎程度百分比分配圖 .....	44
圖 4.9 纖毛蟲的轉彎角度百分比分配圖 .....	45
圖 4.10 橈足類的擴散係數百分比分配圖 .....	46
圖 4.11 纖毛蟲的擴散係數百分比分配圖 .....	47
圖 4.12 橈足類的平均動能長條圖 .....	48
圖 4.14 橈足類的碎形維度散佈圖 .....	50
圖 4.15 纖毛蟲的碎形維度散佈圖 .....	50
圖 4.16 橈足類行為與距離示意 .....	55

## 表目錄

表 2.1 浮游動物行為研究文獻摘要 .....	7
表 3.1 影片內容及代號解釋 .....	17
表 3.2 橈足類動能比較 .....	19
表 3.3 軌跡數目對照 .....	20
表 3.4 時間窗中互動軌跡編碼 .....	33
表 3.5 時間區段中互動軌跡編碼 .....	33
表 3.6 交易資料 .....	34
表 3.7 K-MEANS演算法 .....	35
表 4.1 四種游泳特徵的指標測量平均值 .....	39
表 4.2 以橈足類為觀察主體代號示意 .....	39
表 4.3 以纖毛蟲為觀察主體代號示意 .....	39
表 4.4 橈足類於不同環境的碎形維度平均值 .....	51
表 4.5 纖毛蟲於不同環境的碎形維度平均值 .....	51
表 4.6 距離和NGDR的類別範圍 .....	51
表 4.7 關聯法則 .....	52
表 4.8 成果對照 .....	55



# 第一章 前言

## 1.1 研究動機

在各種資源日漸匱乏的現代，海洋資源比以往更顯重要，然而像是近年漁獲量的遞減或枯竭問題，對人類現今及未來而言已經是切身相關的議題，了解問題的因果機制可讓人類由多方面著手改善問題。海中的魚類是人類直接能利用，作為人類重要的食物來源之一，在海洋食物網中典型的矽藻-橈足類-魚食物網 (diatom-copepod-fish food webs)，魚類是位於此關係的頂端，魚類產量是可藉轉換海洋中數量龐大的浮游生物而成，轉換時需要考慮能量在各營養階層轉換的效率 (ecological efficiency)，近海地區的魚類在到達人類可利用程度之前，由浮游生物到魚類約需要 3 個營養層的轉變，湧昇流區的魚類可能需要 1 或 2 層的轉換，而遠洋區則需要多達 5 層的轉換，各轉換層中的食物網關係遠較陸域系統複雜。如圖 1.1 所示，在海洋食物網中浮游動物是許多經濟性魚類及水產的重要食物，牠們對人類而言雖不能直接利用，但浮游動物的互動不僅影響全球的碳固定和物質通量 (material fluxes)，也直接影響漁業的產量，所以了解浮游動物互動是一項重要的議題 (Pohnert, 2005；MZC2, 2001)。

橈足類與纖毛蟲都是構成海洋食物網的重要聯繫角色，分析兩者之間的互動，也是了解海洋生產力必要的一環。浮游動物中的橈足類雖然不可被人類直接利用，但其在典型的矽藻-橈足類-魚食物網是魚類的重要食物來源，如圖 1.1，而微浮游動物在浮游動物生態系統中是一個相當重要的結構與功能 (Sherr & Sherr, 2002)，其可被視為介於微生物圈與典型食物鏈之間的一個營養的連結 (Calbet & Saiz, 2005)，經過多年研究，微浮游動物中的纖毛蟲已經顯示其是海洋及淡水系統裡浮游動物的重要食物來源 (Stoecker & Capuzzo, 1990)，在此關係裡纖毛蟲所扮演的角色是聯繫微生物食物網與典型的矽藻-橈足類-魚食物網之間的重要連結，這裡暗示海洋及淡水系統中的能量流或是質量流應該都會通過纖毛蟲，藉著被獵食或掠食其他生物 (Cushing, 1989)。



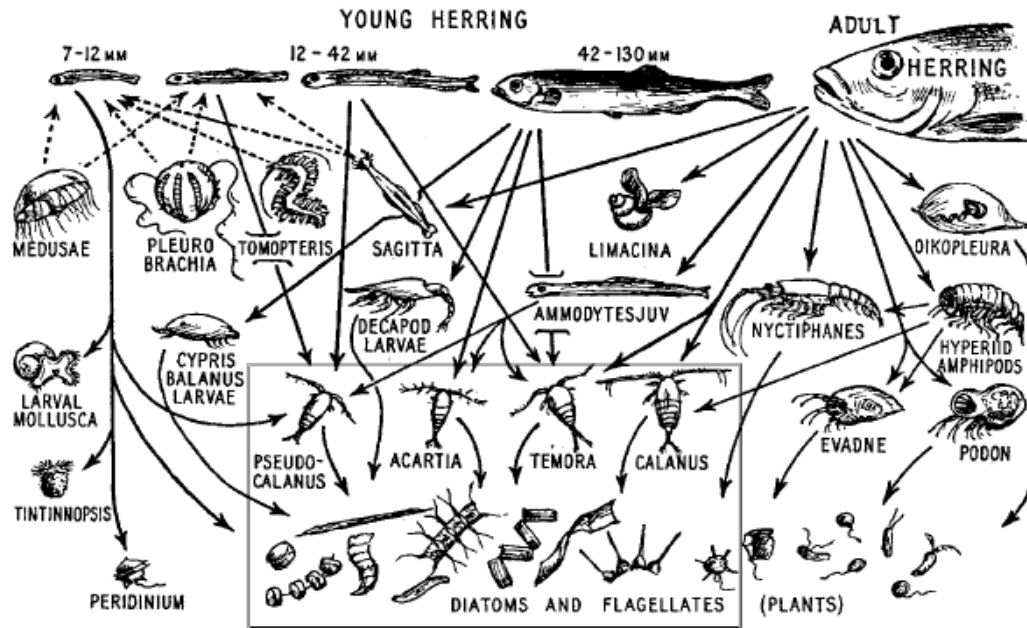


圖 1.1 典型的海洋食物網，其中方框部分是矽藻與橈足類(Pohnert, 2005)。

## 1.2 研究目的

浮游動物的研究層面十分多樣化，根據第一屆海洋浮游動物研討會(the First Marine Zooplankton Colloquium, MZC1, 1989)對浮游動物研究進行以下 7 項議題分類：(1)小尺度的浮游動物個體行為，(2)環境變化性在個體生理及行為的影響，(3)過去和現在關於環境狀況對成長、繁殖力與死亡率之情形，(4)定義營養需求，(5)族群動態及變化的長期觀測，(6)種類辨識的重要性，(7)發展生態-物理模式。經過十多年議題(1)小尺度的浮游動物個體行為仍是研究者研究的重點(MZC2, 2001；Doall et al., 2002；Schmitt et al., 2006；Yen et al., 2008)，議題(1)是想要了解在自然環境中浮游動物個體行為以及牠會如何與其他有機體互動(MZC1, 1989)，本研究目地也是在議題(1)範圍內，而且因浮游動物游泳與攝食具有密切關係(van Duren & Videler, 1995)，本研究進行關於掠食者-獵物互動情形的研究，藉由量化的分析互動環境下橈足類與纖毛蟲的軌跡，了解橈足類與纖毛蟲在自然界中真實攝食情形的游泳行為特徵。本研究目地如下所示：

1. 對不同環境中的橈足類與纖毛蟲游泳軌跡資料，以五種運動型指標進行測量分析，得到關於橈足類與纖毛蟲在不同環境中的游泳行為特徵。

2. 對橈足類與纖毛蟲互動行為進行編碼工作，重新詮釋橈足類與纖毛蟲的互動軌跡，並使用資料採礦技術對橈足類與纖毛蟲互動編碼資料進行分析，更深入了解關於橈足類與纖毛蟲的互動型態。

### 1.3 研究流程

本研究的研究流程首先是確認研究的目的，主要是分析橈足類及纖毛蟲游泳行為的特徵以及兩者互動型態，並經過瀏覽相關文獻的方式了解關於橈足類及纖毛蟲近年來的研究成果，以及用於測量橈足類及纖毛蟲軌跡的運動型指標情形，與針對運動軌跡分析這類型序列的技術，藉文獻回顧確立研究方法，是透過運動型指標、互動軌跡編碼以及資料採礦等技術進行橈足類及纖毛蟲軌跡分析，最後根據成果分析提出結論與建議，研究流程如圖 1.2 所示。

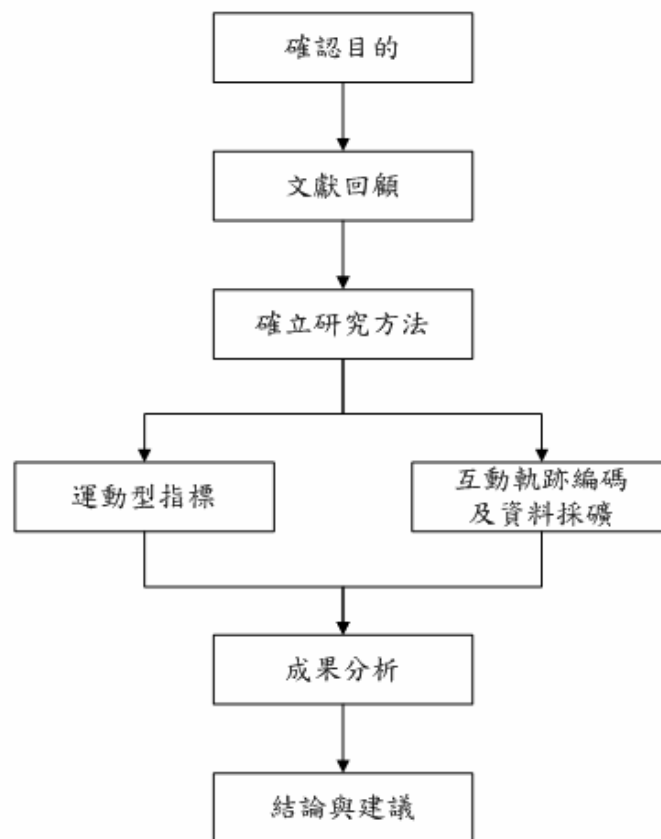


圖 1.2 研究流程

### 1.4 研究限制

關於橈足類及纖毛蟲的游泳軌跡研究，最佳的方式應該是以三維資料進行分

析，探討橈足類及纖毛蟲軌跡應該以 x-y-z 座標方式立體呈現，以此方式所得的軌跡資料及後續測量的分析成果才最符合自然界的真實情況(Seuront et al., 2004b ; Uttieri et al., 2007 ; Yen et al., 2008)，然而，本研究所分析的橈足類及纖毛蟲實驗記錄影片並非以三維尺度拍攝，而是二維拍攝的影片記錄，橈足類及纖毛蟲軌跡是以 x-z 座標方式平面呈現(Seuront et al., 2004a ; Jakobsen et al. 2005 ; Jakobsen et al. 2006 ; Hansson & Kiørboe, 2006)，因為二維的記錄是將原本三維的軌跡投影至二維平面，如圖 1.3，所以相關於距離等參數都會遭低估，受距離的影響本研究所使用的運動型指標也都會因此可能被低估。

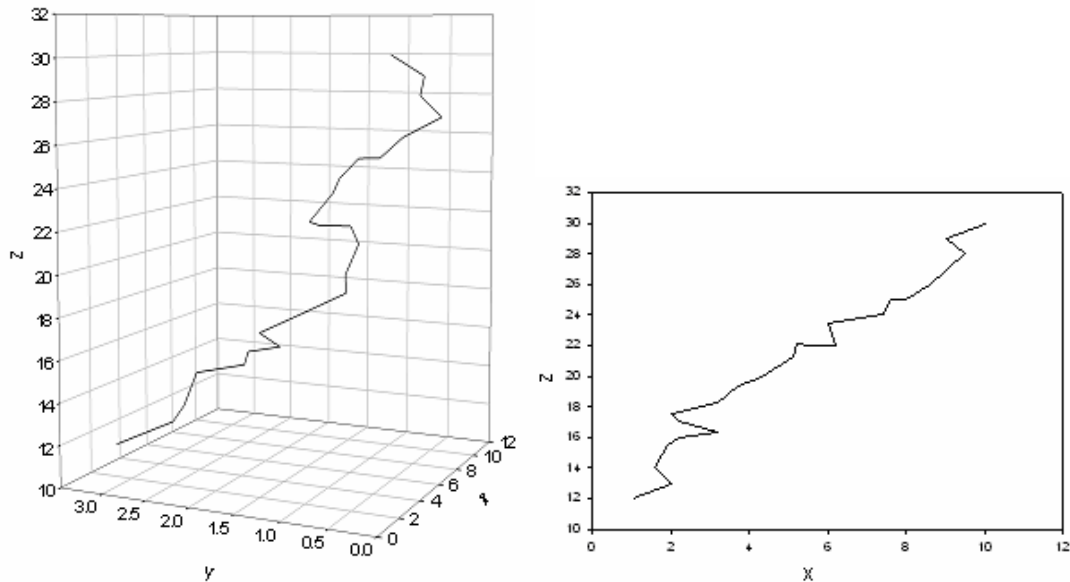


圖 1.3 a 為 3D 軌跡，b 為 2D 投影

## 第二章 文獻回顧

本章將介紹本研究的相關文獻，首先是關於橈足類*Acartia tonsa*的特徵及游泳行為在目前的研究成果，其次則是介紹測量浮游動物行為特徵的指標，並對文獻中是使用哪些指標以及指標是用在哪些浮游動物的行為上進行摘要整理，此節會著重在本研究所選取的指標，以及這些指標運用在浮游動物行為特徵的情形，最後是關於橈足類與纖毛蟲互動軌跡編碼結合資料採礦技術的相關介紹。

## 2.1 橈足類的相關研究

直到最近二十年，科學家才了解到微生物以及浮游動物在海洋及淡水系統中所扮演的重要角色(Azam et al., 1983 ; Calbet & Saiz, 2005)，浮游動物中的纖毛蟲可能是聯繫微生物食物網及典型矽藻-橈足類-魚食物網的重要橋樑(Cushing, 1989)，為了解此重要的連結需要對橈足類及纖毛蟲進行仔細的研究(Broglio et al., 2001)。

在Jonsson & Tiselius(1990)的研究中進行有關橈足類*A. tonsa*的攝食實驗，實驗中提供不同的纖毛蟲作為橈足類的食物，研究者對橈足類其攝食行為、獵物偵測和捕食效率進行觀測，攝食實驗方面，*A. tonsa*對不同纖毛蟲的清除率也有所差異，獵物偵測方面，*A. tonsa*對體積較小的纖毛蟲，其偵測距離較短，在捕食效率方面，*A. tonsa*捕食纖毛蟲*Mesodinium rubrum*的效率遠低於其他纖毛蟲，其原因可能是*M. rubrum*特殊的游泳行為所導致。

Titelman(2001)研究不同橈足類之間的掠食者-獵物互動中的游泳及逃跑行為，想了解獵物行為如何影響掠食者風險，此實驗使用兩種橈足類的幼蟲作為獵物的角色，分別是*Temora longicornis*和*A. tonsa*，其他種類的橈足類是作為掠食者角色，在對掠食者的偵測能力，*T. longicornis*可能較*A. tonsa*更為敏感，而在面對掠食者的反應，*T. longicornis*採取減少與掠食者相遇的策略，*A. tonsa*的策略則著重在相遇後的逃跑行為。

Jakobsen et al.(2005)觀察兩種不同攝食方式的橈足類*A. tonsa*和*T. longicornis*

在面對獵物的移動性及濃度的影響下的攝食情形，此研究欲了解這兩種橈足類在獵物偵測、清除率 and 是否有所差異，使用統計方法檢定實驗的數據，得到的結論是在清除率上兩種橈足類並沒有顯著差異，但 *A. tonsa* 對獵物有所偏好，*T. longicornis* 則沒有，而在獵物偵測方面上 *T. longicornis* 的偵測能力較佳。

Visser & Kiørboe(2006)研究浮游動物移動特徵及相遇率時，曾比較不同浮游動物間(有包含橈足類 *A. tonsa*)的擴散與大小關係時，發現浮游動物的移動距離尺度與其擴散之間經迴歸之後呈現線性的關係，若浮游動物大小越大，則其擴散尺度也越大，反之則越小。

多數有關橈足類研究通常只單獨針對橈足類進行分析，或是比較不同橈足類的差異，僅有少數研究是著重在橈足類與纖毛蟲的掠食者-獵物的互動，而這類少數的研究又常把重點放在橈足類的清除率的分析上(Broglio et al., 2001)，有涉及到橈足類和纖毛蟲在互動時的行為特徵研究的分析是十分罕見，而這議題就是本研究的重點。

## 2.2 運動型指標的相關研究

此節會介紹本研究瀏覽過關於浮游動物行為研究的相關文獻，並整理出這些文獻在浮游動物行為研究中所關注的議題以及其使用的指標或方法，最後並跟本研究選用的指標相關者做較仔細地介紹。

本研究分析的橈足類和纖毛蟲互動行為特徵資料均來自記錄這些浮游動物的移動軌跡，要判斷軌跡的特徵，若僅僅靠目視形式的觀察，是遠遠不能準確表示其特徵，也容易陷入錯誤印象中，所以藉由使用指標來測量這些軌跡記錄，讓這些指標將軌跡資料所代表的特徵客觀地呈現。

本研究所採用的指標有 NGDR(net-to-gross-displacement-ratio)、轉彎程度、擴散係數、動能與碎形維度，除動能之外，其餘四個指標皆是從文獻瀏覽所得為基礎，下表為本研究瀏覽相關浮游動物行為指標之文獻經整理而成。

表 2.1 浮游動物行為研究文獻摘要，依年份順序由 1983 年到 2008 年。

年份	作者	對象	指標	重點
1983	Buskey	橈足類	NGDR、速度、轉彎行為	游泳行為
1990	Jonsson & Tiselius	橈足類、纖毛蟲	行為觀察	掠食者行為
1993	Strom & Buskey	鞭毛蟲	NGDR、成長率、清除率、速度	攝食、成長與行為
1995	Saiz & Kiørboe	橈足類	清除率、消散率	攝食模式
1995	van Duren & Videler	橈足類	NGDR、速度、行為觀察	游泳行為、不同成長階段比較
1996	van Duren & Videler	橈足類	NGDR、速度	攝食、尋找配偶和躲避天敵間的權衡
1996	Villanueva et al.	浮游動物	NGDR、轉彎率	游泳行為、食物搜尋
1997	Dodson et al.	橈足類	速度、下沉率、轉彎角度	游泳行為
1998	Marguerit et al.	橈足類	碎形	擴散模式
1998	Weissburg et al.	橈足類	NGDR、轉彎行為	運動分析
1999	Mazzocchi & Paffenhöfer	橈足類	NGDR、速度	游泳、攝食行為
2000	Suchman	橈足類	速度、反應距離	逃跑行為
2001	Broglio et al.	橈足類、纖毛蟲	行為觀察	互動
2001	Jakobsen	單細胞動物	速度、轉彎方向	逃跑反應
2001	Schmitt	橈足類	碎形、轉彎	游泳行為
2001	Titelman	橈足類	轉彎角度、速度、行為觀察	互動
2002	Doall et al.	橈足類	轉彎角度、行為觀察	游泳行為
2003	Bartumeus et al.	微浮游動物	Lévy flight distribution	食物多寡

2003	Titelman & Kiørboe	橈足類	行為觀察	移動性、相遇率
2004a	Seuront et al.	橈足類	NGDR、速度、碎形	游泳行為
2004b	Seuront et al.	浮游動物	碎形	游泳行為
2005	Calbet & Saiz	橈足類、纖毛蟲	文獻瀏覽	食物網關係
2005	Jakobsen et al.	橈足類	擴散、NGDR、速度	行動性、濃度
2005	Kiørboe & Bagøien	橈足類	相遇率、速度、擴散係數、距離	移動特徵、配偶相遇率
2006	Visser & Kiørboe	浮游動物	擴散、NGDR	移動性、相遇率
2006	Waggett & Buskey	橈足類	速度	互動、相遇率
2007a	Waggett & Buskey	橈足類	速度、流場	逃跑行為
2007b	Waggett & Buskey	橈足類	速度、距離、轉彎率	逃跑行為
2007	顏彰慶	纖毛蟲	NGDR、擴散、碎形、轉彎	游泳行為、食物濃度
2008	Kiørboe	橈足類	速度	游泳策略
2008	Yen et al.	橈足類	速度、移動數目、NGDR、逃跑事件數目、動物聚合數	運動分析

(註：表中的方法欄位中的”行為觀察”是指文獻中對浮游動物行為的一般性敘述，但並沒有明確的量化方法來佐證此段敘述。)

由上表可知有關浮游動物行為研究的指標，並不止於本研究所採用的五種，然而就本研究的資料屬性，有部分指標因資料缺乏必要參數而不能運用，最後選擇五個指標運用在本研究中，即 NGDR、轉彎程度、擴散係數、動能與碎形維度。

### 2.2.1 NGDR(Net-to-gross-displacement-ratio)

在浮游動物行為研究中，NGDR 指標通常是用在測量浮游動物移動軌跡，使用該指標的測量結果可以看出浮游動物個體的移動趨勢，或是其行為特徵，以下

是在文獻中有使用 NGDR 指標的部份。

Buskey (1983)研究生物螢光對海洋橈足類游泳行為的影響時，曾對橈足類 *Acartia hudsonica* 的游泳特徵進行研究，藉NGDR的使用與測量其平均游泳速度結果做比較，發現兩者呈現正相關的關係，此代表的意義是橈足類平均游速越高，則NGDR也就越高，具有生物螢光的浮游動物游泳軌跡顯示有較少曲折路徑與較高的游速，此行為可能會讓自然中的橈足類遠離具生物螢光的浮游動物。

Strom & Buskey(1993)研究鞭毛蟲 *Oblea rotunda* 的攝食、成長情形及行為時，其行為分析便是使用 NGDR 測量鞭毛蟲的軌跡，搭配其他測量指標，如游速和轉彎率等，最後使用統計檢定來判斷三組指標之間在不同實驗狀況下的關係。

van Duren & Videler(1995)想要了解橈足類性別之差異於不同食物濃度下，是否影響其游泳軌跡，實驗設計是將不同食物濃度下的橈足類 *T. longicornis* 的成蟲，依照性別分雌雄兩類別，並計算兩者的 NGDR 後，繪製成盒形圖比較兩者之間的差異，最後得到在不同性別與食物濃度下，橈足類 NGDR 沒有顯著差異，表示橈足類性別之差異在不同食物濃度環境不影響其游泳軌跡。

Weissburg et al.(1998)把 NGDR 指標運用在橈足類 *T. longicornis* 配偶追蹤的情形上，分析有或沒有去追蹤雌性的雄性橈足類軌跡並計算其 NGDR，得到有追蹤雌性的雄性橈足類 NGDR 會高於沒有追蹤雌性的雄性橈足類結果，此結果顯示雄性橈足類在追尋配偶過程中會採取較筆直的路徑。

Mazzocchi & Paffenhöfer(1999)的研究中將 NGDR 運用在分析橈足類 *Clausocalanus furcatus* 的游泳軌跡，當作量化其行為特徵的指標之一，並將結果製作成長條圖，比較不同時間(早上、午後、傍晚和深夜)之間的 NGDR 差異性，發現在午後這時段的 NGDR 最低，而其他三段時間的 NGDR 則差異不大。

Jakobsen et al.(2005)在研究浮游動物的移動性時，使用 NGDR 來計算纖毛蟲



*Balanion comatum* 和鞭毛蟲 *Heterrocapsa triquetra* 的游泳軌跡趨勢，並把結果繪製成次數分配圖，用以判別兩者的游泳軌跡特徵，發現 *B. comatum* 有峰值在 0.2~0.4 之間而且類似常態分佈，表示其移動較為曲折，而 *H. triquetra* 則是類似左偏分佈，有峰值在 0.8~0.1 之間，表示其游泳大多是直線型移動。

### 2.2.2 轉彎程度(Turning rate)

研究浮游動物的行為中，生物的轉彎是令人感興趣地方，是有何因素影響浮游動物原本行進的路線，導致其必須轉彎，而牠們轉彎的情形又是如何等等問題都顯示轉彎行為的生物意義具有研究的價值，所以不同研究者根據其所關注的議題，對於轉彎行為的測量也有各自的著重之處。

Buskey et al.(1983)的研究中使用三種參數，分別是平均游泳速度、衝刺游泳速度以及轉彎行為來量測會發生物螢光與不會發光的橈足類移動，由結果得到這三個參數在不會發光的橈足類身上通常是正相關，雖有小部分試驗為例外狀況，但在大多數情況中平均游速越快，衝刺速度也越快，轉彎的情形通常也越多，而會發光的橈足類則沒有此關係。

Villanueva et al.(1996)使用轉彎率來量化浮游動物 *Octopus vulgaris* 的轉彎行為，其結果顯示當獵物存在時，*O. vulgaris* 傾向會增加其轉彎率和減少其游泳速度，推測此兩種反應皆可以改善 *O. vulgaris* 對區塊內食物的探查。

Dodson et al.(1997)研究在不同食物與光照環境下，對同屬不同種的四種橈足類的行為特徵進行量化，使用游速、下沉率和轉彎角度等指標來詮釋橈足類的行為，再將以上量化指標與食物及光照因子進行統計分析，其結果顯示食物與光照對橈足類行為有重大影響。

Weissburg et al.(1998)的研究中藉運動分析來分析橈足類的軌跡，研究者使用轉彎做為測量橈足類軌跡的工具並將此應用在運動分析上，並以 X-Z 與 Y-Z 平面兩種方向來表示橈足類在空間中的轉彎情形。Jakobsen(2001)研究浮游動物逃

跑反應時，導入角度作為量測纖毛蟲自然跳躍及逃跑跳躍的指標，得到研究中所有的纖毛蟲的跳躍大致上都是呈水平方向，小部分跳躍則有稍微向上的趨勢。

Titelman(2001)研究橈足類幼蟲於掠食者-獵物互動時的游泳及逃跑行為，記錄橈足類 *Temora longicornis* 跳躍的角度當作其行為的特徵，並與其所預期的跳躍角度並列，比較兩者發現其差異性不明顯且具有類似的趨勢。

### 2.2.3 擴散係數(Diffusion coefficient)

動物在介質中的擴散可分為物理的被動擴散以及生物的主動擴散，物理擴散是因為動物周圍液體性質的關係，而生物擴散則是因動物游泳的緣故(Marguerit et al., 1998)，本研究是分析浮游動物游泳行為，所以生物擴散將是本研究所關注的重點，而擴散係數則是測量擴散行為的指標。

Visser & Thygesen(2003)在探討浮游動物的隨機移動性時，將擴散係數導入隨機巡航移動、隨機跳躍移動、游泳-停頓隨機移動與相遇-停頓隨機移動等四個不同移動性模式中，且因應不同移動性模式的參數而改寫擴散係數的形式。

Jakobsen et al.(2005)研究浮游動物的獵物移動性對橈足類攝食的影響時，對纖毛蟲 *Balanion comatum* 的游泳軌跡進行擴散係數的分析，並以圖呈現，發現在短時間內(低於 0.5 秒)纖毛蟲軌跡接近線性移動，而在較長時間中，軌跡的擴散係數較接近擴散型移動，但實驗中的掠食者 *A. tonsa* 其反應距離短於纖毛蟲的擴散尺度，所以在短距離時，擴散行為扮演的是比較次要的角色。

Visser & Kiørboe(2006)為了解浮游動物移動特徵與相遇率之關係，對多種浮游動物，包括細菌、鞭毛蟲、纖毛蟲和橈足類等的軌跡進行擴散係數的分析，發現橈足類的擴散係數高於其他浮游動物，並且推測在掠食者-獵物關係中，當橈足類本身是掠食者時，橈足類可能會進行彈道型移動，而當本身是獵物時，則會採取擴散型移動。

#### 2.2.4 動能(Kinetic energy)

能量是生物存活的關鍵，由最適捕食理論(Optimal foraging theory)(Pyke, 1984; van Duren & Videler, 1995; Viswanathan et al., 1999)來看生物的行為莫不受能量的影響，因此本研究選擇動能作為觀測浮游動物能量與行為的切入點，然而，有關能量指標在浮游動物行為之應用，經過相關文獻瀏覽後，發現以此觀點來描述橈足類或纖毛蟲等這類浮游動物行為的文獻甚為罕見，雖有一些文獻有用到能量的概念，但並沒有將能量作量化分析，僅停留在概念的階段，或是使用假設情境，其數值並非真實數據。雖然以動能作為測量指標的文獻十分罕見，但使用速度當作浮游動物行為的衡量指標之文獻則十分普遍，依動能公式來看，浮游動物的速度也可以當作動能的部份表現形式。

本研究的橈足類和纖毛蟲的質量均參考自文獻(Vlymen, 1970; Jonsson & Tiselius, 1990; Titelman, 2001; Jakobsen et al., 2005; Hansson & Kiørboe, 2006)，根據文獻回顧後了解橈足類和纖毛蟲的質量及體積差異，本研究是以影片進行分析，要區分不同隻的橈足類並不容易，本研究根據文獻回顧得到橈足類成蟲質量差異不大，故假設所有觀測到的橈足類質量均是相同的情況，纖毛蟲質量也假設是相同的，而且根據動能公式在本研究中橈足類之間的動能差異，主要來自於其速度平方的關係，質量的影響較小。

Vlymen(1970)研究有關橈足類 *Labidocera trispinosa* 游泳時的能量支出 (energy expenditure)，其模式是計算在一個假設的固定游泳速度下，以及由零加速到某依特定速度的橈足類能量支出，固定游速下的能量支出會顯示橈足類在游泳時所耗的能量，而有關橈足類的加速時的能量支出表現出橈足類的一個優勢，容易加速到較高的速度可增加生存機會。

van Duren & Videler(1995)對橈足類 *T. longicornis* 不同成長階段游泳行為的研究中，將雄性與雌性橈足類分別作平均游泳速度的次數分配圖，發現雄性的速

度符合常態分配，而雌性則沒有此特性，在比較不同時期的平均速度，成蟲速度遠較幼蟲來的快，在同樣是成蟲情形下，雄性速度又比雌性高出甚多。

Suchman(2000)在橈足類 *Acartia hudsonica* 逃跑行為的研究中，將 *A. hudsonica* 分別與兩種不同掠食者放在一起，並測量其逃跑速度，得到 *A. hudsonica* 面對不同掠食者時的逃跑速度有差異，在 *Cyanea sp.* 為掠食者時，*A. hudsonica* 逃跑速度較快，而在 *Aurelia aurita* 是掠食者時，*A. hudsonica* 的反應距離較長，可以從容逃走，不需要太高的逃跑速度。

Titelman(2001)研究橈足類 *T. longicornis* 在與其它橈足類互動行為時，測量 *T. longicornis* 成蟲及幼蟲階段的跳躍速度，並將結果依體長大小繪製成盒形圖，具體呈現出不同時期跳躍速度的情形，知道體長在 400 $\mu\text{m}$  以上的橈足類跳躍速度最快，而體長在 300 $\mu\text{m}$  以下的橈足類則速度都差異不大。

Kjørboe(2008)研究有關遠洋中的橈足類在配偶搜尋上的最佳游泳策略中，有提到橈足類找尋配偶需要消耗相當多的能量，同時也使本身被捕食的風險增加，而其進行其他行為時也要消耗能量，所以研究者認為在總能量固定下，橈足類會對其游泳行為有權衡(trade-off)的考量。

#### 2.2.5 碎形維度(Fractal dimension)

過去關於浮游動物行為上的研究很少應用碎形維度進行分析，多是使用標準測量指標，如速度及 NGDR，但近來的研究以證明碎形分析對於浮游動物游泳行為是很有用的工具(Seuront et al., 2004a)。碎形維度的重要特性是其尺度獨立(scale-independent)，表示其測量的單位不影響它的測量結果，而其結果可提供關於路徑複雜性的資訊(Seuront et al., 2004a；Seuront et al., 2004b)。

Schmitt & Seuront(2001)針對橈足類 *T. longicornis* 的 3D 軌跡進行多重碎形與軌跡測量的統計分析，並提出關於多重碎形的新機率程序，可將此所獲得有關的資訊用在理論模式的數值模擬內。

Seuront et al.(2004a)使用尺度相依與尺度獨立的測量來研究亞熱帶橈足類 *Oncaea venusta* 的游泳行為，其中的尺度獨立的測量即是碎形維度，將碎形維度用在雄性及雌性的路徑後，經比較後得到兩者的碎形並沒有顯著差異，但個別路徑的比較可發現碎形維度越高其路徑越趨於複雜。

Seuront et al.(2004b)對浮游動物 *Daphnia pulex* 和 *T. longicornis* 的游泳行為的 3D 軌跡紀錄使用碎形來分析它，兩者的路徑都具有高度不規則的部分與較接近直線的軌跡，藉碎形的分析知道 *D. pulex* 和 *T. longicornis* 的游泳行為可能屬於不同的擴散形式，*D. pulex* 是尺度相依的擴散，而 *T. longicornis* 則為尺度獨立的擴散方式。

經由以上相關文獻可知有關研究浮游動物行為的議題，或多或少都有借助指標來量化浮游動物的行為，並配合觀察其行為來佐證指標量化的結果，在近二十年來，已經累積不少的研究成果，對了解某些浮游動物的個體行為特徵很有幫助，然而關於自然界中物種間的基本關係，掠食者-獵物互動的行為特徵研究成果並不多見，故本研究參考相關文獻的各類指標運用於浮游動物行為的做法，將採用的指標運用於掠食者-獵物互動的行為上，期望在指標運用之下，對於橈足類與纖毛蟲的互動行為有更清楚的了解。

### 2.3 序列編碼及資料採礦技術(the code of the sequence and data mining)

橈足類及纖毛蟲資料經各個指標量化後，可以得到不少有關的行為特徵成果，由這些成果可以了解到橈足類及纖毛蟲在不同環境中的行為反應，但若只以指標觀點來看研究橈足類及纖毛蟲行為可能會有所還是不足，指標所呈現的結果必須經過整理、摘要化後方能讓人了解，所以對橈足類及纖毛蟲互動行為的結果並不能完整地揭露出來，本研究希望能更深入地了解橈足類及纖毛蟲互動時的移動情況。

橈足類及纖毛蟲這類的移動路徑或互動行為的軌跡是屬於在連續時戳

(timestamps)下的空間位置的序列，此類型的軌跡序列若以量化形式表達，其資料量會十分龐大，而且空間位置是屬於數字系統很難準確重複在每個特徵實例上，基於以上理由本研究把橈足類及纖毛蟲的空間位置轉換成空間區域，即將攝影區域網格化，並對互動行為進行類別化形式的描述重新對橈足類及纖毛蟲軌跡編碼，再使用資料採礦技術分析(Hernández et al., 1995；Cao et al., 2005；Miene et al., 2004；Lattner et al., 2006)。

Cao et al.(2005)研究追蹤物體移動軌跡的議題，此類型的資料大都是時空序列，例如現實中車輛的移動路線，研究者研究序列特徵探索的問題，並想要在其中找尋出頻繁的時空序列特徵，藉著使用網格及子字串樹(substring tree)等啟發式解法，可以有效率地選取出移動軌跡中的頻繁特徵(frequent patterns)。

Xia et al.(2005)研究 Phillip 島的觀光客的時空移動特徵，研究者想要辨認顯著的遊客移動特徵並藉由遊客資料及現存的資料採礦技術進行挖掘分析，首先使用類別化將一天時間轉換成四個時間區段，並將空間上的移動則簡化為景點的序列，最後並利用群集(cluster)和分類(classification)中的決策樹技術，前者得到拜訪景點的遊客類型，後者則找出遊客移動的某些規則。

Miene et al.(2004)對智慧型車的移動進行質化移動描述的分析，研究者將車子行進的方向與距離分別簡化為 8 個方向與 4 個等級的距離，並將連續時間片段合成多個時間區段，區段內的車子移動使用質化描述代替原本的量化資料，以上工作稱為質化移動描述並藉此來詮釋關於眾多的交通狀況，能有效率地根據所得的時空資訊來進行推論，若資料不精確時，使用此表示法可以得到相似的結果，而量化表示法就可能會得到不同的情況。

Lattner et al.(2006)將序列特徵採礦技術用在機器人足球(robotic soccer)上，機器人足球是隨時間變動的動態環境，具備時空的資訊，藉著使用移動方向、速度、空間方向及物體間的距離等質化移動描述讓研究者能詮釋其場面，並且對應原來

場面的量化的資料，並將連續時間片段合成時間區段而形成移動特徵的描述，最後應用資料採礦技術中的關聯法則獲得可供行為決策使用的法則。

在擷取知識方面，賴柏全(2005)藉由資料採礦中的決策樹技術建立相對應的焚化爐決策樹模型，預測能力及正確率都足以提供給現場操作人員做參考。鄒明城與孫志鴻(2004)用其累積的地理資料，經地理資訊系統整理後，使用資料採礦技術進行分析，探勘後所獲得的知識與模式都具有良好的準確性。顏彰慶(2007)使用資料採礦技術中的分類、分群與關聯法則在纖毛蟲 *Strobilidium* sp.於不同食物濃度環境下的行為資料，並得到其行為的一些法則，這些法則可以當作纖毛蟲處於不同食物環境中的基本特徵。

從上述文獻得知，指標適用於描述橈足類及纖毛蟲互動軌跡的整體變化，但比較不能詮釋更細微的互動形態，如橈足類對某狀況的反應，因此本研究先運用指標測量橈足類及纖毛蟲的整體互動特徵，再搭配軌跡編碼及資料採礦技術，期望能對橈足類及纖毛蟲互動型態有更深入的了解。

### 第三章 研究方法

對於橈足類與纖毛蟲互動行為分析，本研究運用 NGDR、轉彎程度、擴散係數、動能和碎形維度等五項指標對橈足類與纖毛蟲運動軌跡的測量，並結合橈足類與纖毛蟲互動軌跡編碼及資料採礦的結果分析，加深對橈足類與纖毛蟲的互動型態的了解，以下將針對本研究的資料前處理、運動型指標與互動軌跡編碼及資料採礦技術進行說明如下。

#### 3.1 資料處理

本研究所使用的實驗記錄影片是由國立台灣海洋大學黃將修老師提供，在此簡述這些實驗記錄影片的實驗狀況，實驗生物是由 The University of Texas Marine Science Institute(Texas, USA)的實驗室長期培養而成，攝影時間是 2004 年 8 月 1 日到 8 月 2 日，所有攝影都是在盡量相同環境條件下完成( $22\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、暗室)，根據各實驗需求將橈足類成蟲 *Acartia tonsa* 共 15 隻以及纖毛蟲置於  $45\text{mm}\times 12\text{mm}\times 20\text{mm}$ (長 $\times$ 寬 $\times$ 高)的實驗瓶中，在攝影前都預留約 15 分鐘的時間讓橈足類或纖毛蟲適應環境後才開始攝影。實驗記錄影片共有 5 支，分別代表 5 組實驗，每支影片錄影的時間大概都在 1 個小時左右，表 3.1 是關於這 5 個實驗的對象、代號及攝影時間的簡述，Co 代表橈足類(Copepod)，Ci 代表纖毛蟲(Ciliate)，A 代表藻類(Algae)，藻類是以三種藻類(*Isochrysis galbana*, *Gymnodinium Sp.*, *Rhodomonas Sp.*)以 1:1:1 情況混合。5 支實驗記錄影片轉換成可供分析的浮游動物軌跡座標資料，需要進行數化工作及軌跡資料整理等前置處理，再根據運動型指標與資料採礦的需求對座標資料進行格式轉換，其流程如圖 3.1 所示。

表 3.1 影片內容及代號解釋

影片代號	影片內容	開始拍攝時間
Co	僅存在橈足類(Copepod)	16 時 40 分
Ci_A	存在纖毛蟲(Ciliate)和藻類(Algae)	13 時 15 分
Co_A	存在橈足類(Copepod)和藻類(Algae)	13 時 30 分



Co_Ci_A(1)	存在橈足類(Copepod)、纖毛蟲(Ciliate)和藻類(Algae)	10 時 30 分
Co_Ci_A(2)	存在橈足類(Copepod)、纖毛蟲(Ciliate)和藻類(Algae)，重複實驗	11 時 55 分

(註：上表 Co\_Ci\_A(2) 一列中的“重複實驗”是指其實驗狀況都與 Co\_Ci\_A(1) 相同。在下個章節會提到的代號 Ci\_Co\_A，其影片內容實際上等同於 Co\_Ci\_A，但在相同影片中為區分不同的觀察主體，如橈足類(Co)與纖毛蟲(Ci)，故代號有所差異。)

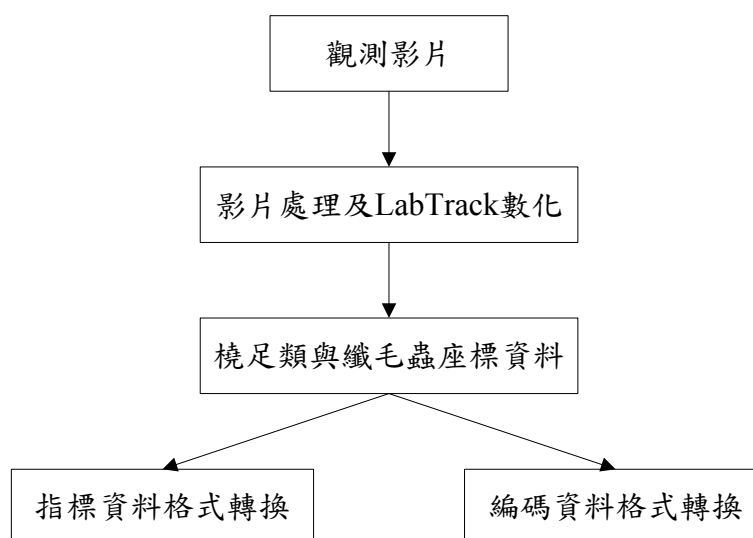


圖 3.1 資料處理流程

### 3.1.1 影像處理

來源資料是影片檔要直接分析是很困難的事，必須將影片檔案數化後才有利於後續分析動作的進行，本研究使用LabTrack (Bioras, Kvistgård, Denmark)進行數化影片記錄的工作，LabTrack是一套用在連續影像中追蹤移動物體的軟體，可進行frame-by-frame的連續影像分析，非常適合用於浮游動物軌跡的追蹤 (Titelman, 2001；Jakobsen et al., 2005；Jakobsen et al., 2006；Kiørboe, 2008)。

LabTrack對輸入影片格式有特定要求，實驗記錄影片檔案格式為m2v檔，並不符合LabTrack的輸入格式，因此實驗記錄影片必須先經過轉檔的過程，轉成LabTrack可接受的avi檔。經過轉檔後影片可以輸入LabTrack，但每支影片的時間都長達1小時，影片檔案過大導致LabTrack運作效能變的極低，經嘗試後確認LabTrack無法輸出完整影片的數化資料，對此問題的解決方式是再對影片進行分

割動作，縮減檔案大小讓LabTrack能夠順利運作，本研究的實驗影片是以29.97fps的格式所記錄而成，因此在轉檔時必須根據此設定進行轉檔，完成轉檔後，再根據影片畫質等因素調整LabTrack的控制參數，並輸入想數化之影片，LabTrack主要是根據影片的frame數目進行影像分析，最後便會自動輸出以每0.033秒為單位的浮游動物軌跡空間座標資料。

原本是以0.04秒進行影像分析，後來修改成0.033秒，所產生的差異是LabTrack對物體速度的計算結果，然而對本研究的運動型指標而言，速度的差異只影響動能一項，因為NGDR、轉彎程度、擴散係數和碎形維度等運動型指標並不涉及速度的計算，故針對動能進行重新計算，並以橈足類為例如表3.2所示，修正後的動能比原本動能數值稍大，但差異十分有限，並不影響本研究所得到的不同環境中的游泳特徵。

表3.2 橈足類動能比較

代號	以0.04秒為單位的平均動能(J)	以0.033秒為單位的平均動能(J)
Co	4.213E-12	4.58E-12
Co_A	7.54E-13	1.02E-12
Co_Ci_A(1)	5.65E-10	5.66E-10
Co_Ci_A(2)	2.96E-10	2.97E-10

### 3.1.2 軌跡資料處理

本研究的研究重點是橈足類與纖毛蟲的互動行為，以代號表示即Co\_Ci\_A(1)和Co\_Ci\_A(2)兩支影片記錄的資料，因此這兩支影片代表的是實驗組，而其他三支影片Co、Ci\_A及Co\_A都是供對照比較使用，是所謂的對照組。在Co\_Ci\_A(1)和Co\_Ci\_A(2)兩影片中，纖毛蟲出現的頻率甚高，並沒有觀測上的問題，但橈足類出現於錄影畫面中的時間並不固定，有時出現數隻，有時一隻都沒有，原本嘗試用每隔一段時間固定抽取一小段時間進行觀測，但使用此方法的結果並不理想，無法準確獲得橈足類在攝影畫面上的軌跡，後為求完整地分析橈足類與纖毛

蟲的互動行為，本研究將橈足類出現在Co\_Ci\_A(1)和Co\_Ci\_A(2)兩影片中的所有軌跡，包括當時在畫面中的纖毛蟲軌跡都一起記錄下來，剔除過短的時段(低於1秒)以及在畫面邊界上不完整的軌跡後，得到Co\_Ci\_A(1)有橈足類軌跡74條、纖毛蟲軌跡209條；Co\_Ci\_A(2)有橈足類軌跡88條、纖毛蟲軌跡223條，將使用這些軌跡作橈足類與纖毛蟲互動行為的分析資料。

Co、Ci\_A及Co\_A等對照組情形又有所不同，對照組的功能是提供比較使用，其內容不具橈足類與纖毛蟲的互動情形，換句話說橈足類與纖毛蟲分別處在各自的環境中未受掠食者或獵物的干擾，其中的浮游動物行為都較單純，因此樣本並不用選取太多(Broglio et al., 2001)，本研究的作法是採取每5分鐘抽出10秒做為分析樣本，最後得到Co有橈足類軌跡32條、Co\_A有橈足類軌跡30條、Ci\_A有纖毛蟲軌跡47條。

表3.3 軌跡數目對照

影片代號	軌跡數目(條)	
Co	橈足類：32	-
Ci_A	-	纖毛蟲：47
Co_A	橈足類：30	-
Co_Ci_A(1)	橈足類：74	纖毛蟲：209
Co_Ci_A(2)	橈足類：88	纖毛蟲：223

### 3.2 運動型指標

浮游動物移動軌跡的特徵可以藉著指標來表達，本研究運用的 NGDR、轉彎程度、擴散係數、動能和碎形等五個指標的概念會在以下一一說明。

#### 3.2.1 NGDR

NGDR是一種可以衡量路徑扭曲的程度的比率(Weissburg et al., 1998)或是有機體藉著改變其運動方向而留在某區域內的趨勢(Buskey, 1983)，其計算方法是用路徑的起點到終點之直線距離除以該路徑的全部距離，以圖3.2為例，假如有機體的軌跡是虛線部分，則該有機體的NGDR是用起點與終點間的直線位移(實線

部分)除以有機體的總路徑長度(虛線部分)。

$$NGDR = \frac{l}{L} \dots\dots\dots (1)$$

$l$  : 有機體起點至終點的直線位移長度

$L$  : 有機體經過的所有路徑長度

由NGDR的定義來看可知道它是無因次單位(dimensionless unit)，此暗示NGDR具有時間敏感性，若有機體的NGDR降低暗示有機體所經過的時間比較長(Jakobsen et al., 2005)。再從公式(1)來看，可得知NGDR值的範圍是介於0到1之間，若有機體的軌跡是低的NGDR值代表該路徑較曲折(circuitous)，路徑形式較為複雜，而高的NGDR代表這條路徑比較接近於直線。

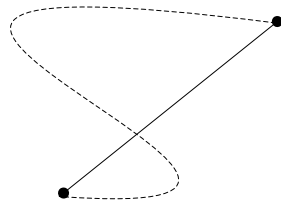


圖 3.2 有機體軌跡示意

要計算本研究所有橈足類及纖毛蟲的移動軌跡的 NGDR，根據其定義必須有兩項數值來計算，分別是軌跡起點與終點間的直線位移以及整條軌跡的總路徑長度，本研究使用 Excel 以及其 VBA 功能編寫程式(其餘指標也是運用此工具進行計算)，可以根據軌跡資料得到必要的兩數值再進行計算，最後會得到該移動軌跡的 NGDR 值。

### 3.2.2 轉彎程度

在描述浮游動物的游泳行為上，轉彎是最常被使用的指標之一(Dodson et al., 1997)，根據實驗者的需求，欲衡量浮游動物行進方向的變化，各有其著重之處，但通常會使用轉彎角度作為轉彎的測量，轉彎角度是用連續 2 次移動的方向差異進行計算，若額外考慮時間的情形下，則會使用轉彎率，把轉彎角度除以其所經過之時間即可得之。

本研究對橈足類或纖毛蟲的轉彎行為的分析是想要了解橈足類或纖毛蟲在不同實驗條件下，例如在有掠食者-獵物互動環境或是未受掠食者及獵物干擾的環境，其游泳行進時方向改變的普遍性，不僅僅是對其中的某些特定行為，如攻擊、跳躍或逃跑等特殊行為進行轉彎的測量分析，而是對橈足類或纖毛蟲全部軌跡的方向變化都進行記錄，藉由軌跡整體的方向變化了解橈足類或纖毛蟲的轉彎行為特徵。

本研究的轉彎程度指標定義為該物體保持原本行進方向作直線運動時，其轉彎程度等於 0，若做相反方向移動，則轉彎程度為 1，而其他方向必須用角度除以 180 度，藉以判斷其程度，使用圖 3.3 進行說明，若有機體由 6 點鐘方向的位置出發，維持相同方向時，轉彎程度為 0(即 12 點鐘方向)，假如有機體由 6 點鐘方向轉向 9 點鐘方向時，其轉角為 90 度除以 180 度，可換算成轉彎程度 0.5，若有機體由 6 點鐘方向右轉 45 度，此時其轉彎程度會是 0.25，若機體由 6 點鐘方向右轉 135 度，此時其轉彎程度會是 0.75。

轉彎程度=0，if 有機體移動方向不改變

1，if 有機體移動方向改變 180° ..... (2)

轉彎角度/180，if 有機體移動方向非上述兩者(顏彰慶, 2007)。

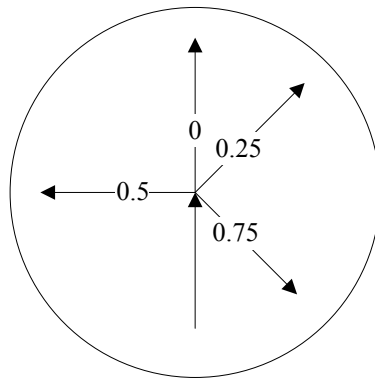


圖 3.3 轉彎程度示意

轉彎程度指標的核心是有關軌跡方向改變的計算，本研究以每條軌跡的起點以及第二點連線(每點間隔時間為 0.04 秒)作為該有機體原本的初始方向，再計算第二點及第三點連線與初始方向比較並配合三角函數的使用，會得到兩者之夾

角，以此概念繼續進行軌跡中的第三點與第四點連線和第二點與第三點連線的夾角計算直到軌跡的終點，完整地記錄整條軌跡的所有轉彎程度。

### 3.2.3 擴散係數

浮游動物的游泳特徵具有相當多的變化，有類似翻滾、跳躍、下沉、螺旋、彎曲和沿直線運動等等特徵，雖然移動特徵變化甚大(Visser & Thygesen, 2003)，但大致可歸為兩類，彈道型(ballistic)移動及擴散型移動兩種(Visser & Kiørboe, 2006)，橈足類與纖毛蟲均屬於浮游動物，所以也可用此分類法對橈足類與纖毛蟲的游泳路徑特徵進行分類。浮游動物的彈道型移動即類似沿直線運動，游泳的速度甚快，經過影片觀測和軌跡分析，彈道型移動因特徵較為單純，可以輕易的被辨認，而擴散型移動的特徵較為複雜多變，比較令人感興趣，本研究也將重點放在擴散型移動上。

在自然科學上有關顆粒擴散的研究與粒子的隨機移動甚相關，可以用隨機移動探討微浮游動物移動行為特徵，也有不少研究在此領域鑽研(Klafter et al., 1996; Bartumeus et al., 2003)，就浮游動物擴散的行為來說，大多數使用布朗運動進行分析已是足夠的(Visser & Kiørboe, 2006)，本研究也是使用布朗粒子的隨機移動公式進行擴散係數的估計(Visser & Thygesen, 2003; Jakobsen et al., 2005)，藉以判斷擴散型移動的擴散程度。

$$D = \frac{r^2}{2nt} \dots\dots\dots (3)$$

r 為位移，D 是擴散係數，t 即所經過的時間，n 為空間維度，在本研究中因實驗記錄影片皆為二維之故，n 等於 2，擴散係數公式可以簡化為下式：

$$D = \frac{r^2}{4t} \dots\dots\dots (4)$$

如同上文所提，浮游動物的游泳特徵十分多樣，橈足類的游泳軌跡不太可能為單一型態，通常會包含彈道型和擴散型兩大類型的移動，所以欲得到橈足類的

擴散係數必須找出橈足類游泳軌跡中哪些段落是屬於擴散型移動的，換句話說必須排除游泳軌跡中的彈道型移動，因此關於擴散係數的作法首先要繪製位移與總路徑的 log-log 圖，如圖 3.4 所示，在此圖中呈現出明顯不同的區域，即斜率等於 1 及小於 1 的部份，而斜率接近 0.5 的段落即軌跡為擴散型移動(Jakobsen, 2005；Visser & Kiørboe, 2006)，找到擴散行移動的部分，根據擴散係數公式(4)，再利用迴歸就能得到擴散係數數值。

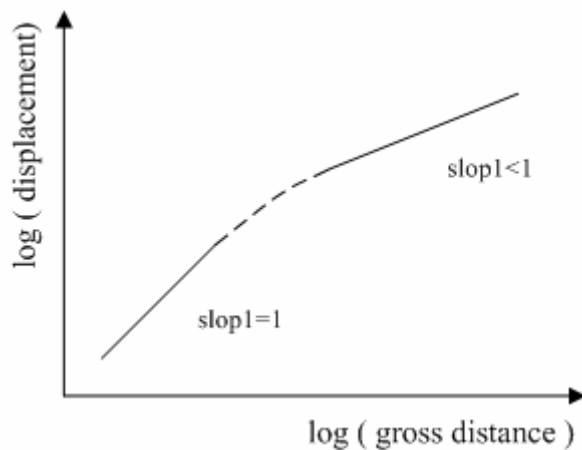


圖 3.4 位移與總路徑的 log-log 圖(Visser & Kiørboe, 2006)

### 3.2.4 動能

本研究期望從能量的觀點測量橈足類和纖毛蟲在不同環境中的反應，藉以了解橈足類和纖毛蟲互動與沒有互動行為時的能量關係，並選擇動能作為測量能量的指標。動能公式如下：

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \dots\dots\dots (5)$$

$m$ 是有機體的質量(單位：mg)， $v$ 為有機體的速度(單位：mm/s)，動能的通用單位是焦耳( $kgm^2s^{-2}$ )，以本研究動能單位( $mgmm^2s^{-2}$ ) 必須再經過換算使單位變成焦耳。

關於橈足類與纖毛蟲質量經文獻瀏覽得知橈足類與纖毛蟲的質量範圍與體型大小(Vlymen, 1970；Jonsson & Tiselius, 1990；Titelman, 2001；Jakobsen et al.,

2005；Hansson & Kiørboe, 2006)，為估計本研究橈足類與纖毛蟲真實質量的資料，並不直接引用文獻的數據，而是根據其體積乘以海水比重(實驗中海水比重為 1.0266)獲得其質量，而橈足類體積使用橢球體積估計公式(6)：

$$V = \frac{4}{3} \pi abc \dots\dots\dots (6)$$

a、b、c分別為橈足類的長寬高，體積單位是mm<sup>3</sup>。

於影片中區分不同的橈足類進而計算每隻的體積並不容易，根據文獻回顧橈足類成蟲體積差異甚微，以公式(5)來看，橈足類和纖毛蟲的動能之高低，其速度影響最大，質量的影響較小，所以本研究假設所有觀測到的橈足類質量均是相同的情況，由影片中選取一隻橈足類作為代表，並計算其質量，纖毛蟲質量也是相同作法。浮游動物在游泳行進時速度並不一致，而導致動能也會跟著改變，所以計算橈足類動能時必須根據其座標及時間資料計算出當時的速度，接著計算動能才能得到與實際較為符合的浮游動物動能數據。

### 3.2.5 碎形維度

碎形維度對於高度不規則形狀提供極有用的量化值，對於本研究碎形可提供橈足類和纖毛蟲游泳路徑複雜性的測量值。碎形維度的概念為尺度發生變化時，該物體之大小變化率為尺度變化率的 D 次方，D 即為碎形維度。以橈足類和纖毛蟲軌跡為例，其路徑可被某特定的劃分單位所分割，根據不同形式的劃分單位延伸出不同的碎形方法，若以網格為劃分單位，稱為盒計法(box-counting)(Seuront et al., 2004a；Seuront et al., 2004c)，若是以線段作為劃分單位，稱為等步進法(structured walk method)或邊界碎形法(boundary fractal method)(Allen et al., 1995；Podsiadlo & Stachowiak, 1998)，不同方法的概念相通，唯演算細節有部分差異，橈足類和纖毛蟲軌跡經過計算後可以知道劃分過後的路徑長度為多少單位，並使用公式(7)計算此路徑的碎形維度。



$$N(\lambda)=k \lambda^{-D} \dots\dots\dots (7)$$

$\lambda$  為劃分路徑的單位， $k$  是常數， $N(\lambda)$  是路徑經單位  $\lambda$  所劃分的數目， $D$  即為碎形維度。碎形維度的計算程序是使用不同的  $\lambda$  代入，會得到不同的  $N(\lambda)$  值，經對數運算整理可寫為下式：

$$D = \frac{\ln N(\lambda_1) - \ln N(\lambda_2)}{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1} \dots\dots\dots (8)$$

碎形維度即為  $N(\lambda)$  與  $\lambda$  的 log-log 圖的線性斜率，最後可使用迴歸得到此線性斜率(Seuront et al., 2004a)。本研究計算所有橈足類和纖毛蟲的移動軌跡的長度，並設定不同的劃分單位  $\lambda$  對每一條軌跡進行劃分動作，從而得到每條軌跡的  $N(\lambda)$  值，最後經由迴歸得到其線性斜率，即橈足類和纖毛蟲軌跡的碎形維度。

### 3.2.6 統計分析

經運動型指標的測量後所獲得的資訊，本研究想知道這些資訊是否與母體特性有所不同，故進行相關的統計分析，Kolmogorov-Smirnov test 是檢定資料的機率分布，本研究使用此方法檢定運動型指標的結果是否符合常態分布，因為常態分布通常是後續檢定的前提條件，使用 K-S test 後，本研究發現多數運動型指標結果並不符合常態分布，在此情形下宜使用無母數的 Mann-Whitney U test 進行後續相關統計檢定(Strom & Buskey, 1993 ; van Duren & Videler, 1995 ; Seuront et al., 2004a)。

- Kolmogorov-Smirnov test

Kolmogorov-Smirnov test (K-S test) 是一種無母數方法 (nonparametric method)，它是檢定資料的累加分配(cumulative distribution)間是否有差異，在小樣本情況下，K-S test 通常比 Chi-Square test 更有效。

K-S test 步驟如下：

虛無假設  $H_0$ ：母體屬於某種機率分配

對立假設  $H_1$ ：母體不屬於某種機率分配

計算檢定統計量  $D$ ： $D = \max|F(x) - S(x)|$  .....(9)

上式中的  $F(x)$  是虛無假設下的累加分配， $S(x)$  是實際觀察的累加分配。

拒絕域  $C = \{D | D > D_{\frac{\alpha}{2}}\}$ ，其中  $D_{\frac{\alpha}{2}}$  為 K-S test 表定臨界值。

根據顯著水準判斷是否拒絕  $H_0$  的假設。

● Mann-Whitney U test

Mann-Whitney U test 是一種無母數方法，其特點是不需要有母體為常態分配之假定或對母體之分配情況做任何假定。此法與兩母體平均數相等之檢定類似，同樣是比較兩個隨機樣本之差異，然後推論到兩個母體間的差異，但不同之處在於 Mann-Whitney U test 不是計算平均數的差異，而是依樣本中變項分數之等級，計算出檢定值  $U$ 。

$U$  值得計算方式是將兩樣本合併，然後依變項分數給予等級，分數高者的等級分數也較高，並依高低排列（由高到低），再分別將每一個樣本中分數所分到之等級加起來。最後比較兩樣本間等級總和的差異。設計此檢定法的觀念是，如果兩樣本之分數分配情況無差異，則兩樣本在混合後排列所得之等級總和應該相當的接近。

基本假設：兩個獨立隨機樣本、測量尺度為等級。

虛無假設  $H_0$ ：對感興趣的變項而言，兩樣本是來自性質相同之母群體。

對立假設  $H_1$ ：對感興趣的變項而言，兩樣本是來自性質不同之母群體。

選擇抽樣分配及建立臨界區：若兩樣本中每個樣本之數目是大於 20 時， $U$  之抽樣分配是趨近常態，所以可用  $Z$  分配表來做為此檢定之基礎。

計算檢定統計：

$$U_1 = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - W_1, \dots\dots\dots(10)$$

$$U_2 = N_1 N_2 + \frac{N_2(N_2 + 1)}{2} - W_2, \dots\dots\dots(11)$$

$N_1$ 、 $N_2$  為兩樣本數目， $W_1$ 、 $W_2$  分別為第 I 及第 II 樣本的等級和， $U = \min(U_1, U_2)$ 。

檢定統計值是  $Z = \frac{U - \mu_u}{\sigma_u}$ ， $\mu_u$  是所有可能樣本之 U 之抽樣分配的平均數， $\sigma_u$  是此種抽樣分配的標準差。

最後根據顯著水準判斷是否拒絕 H0 的假設。(周宏, 2004)

### 3.3 攝食行為的互動軌跡序列資料編碼

雖然以上 NGDR、轉彎程度、擴散係數、與動能與碎形維度等指標可以測量橈足類和纖毛蟲於環境中互動軌跡的部分特徵，但關於掠食者-獵物互動的型態，這些指標能提供的資訊仍然有所欠缺，像是對掠食者的遠距偵測能力無法做出有效的描述，而且掠食者行為可能受獵物分布的強烈影響(Leising & Franks, 2002; Seuront et al., 2004a)，所以本研究進行以下有關兩者軌跡移動的序列編碼與後續的資料採礦分析期望能更進一步了解掠食者-獵物互動的型態。

對於受獵物的分布所影響的掠食者行為及遠距偵測能力的分析，以本研究的橈足類和纖毛蟲互動來說明，若環境中某處存在有纖毛蟲，而橈足類則在另一處，再下一個時間點時，橈足類會有什麼反應，是往纖毛蟲處移動還是有其他的行為？這類型的行為分析無法經由先前的五項運動型指標測量而得，故本研究使用另一種不同於指標測量的方式進行分析，我們將橈足類和纖毛蟲互動軌跡編碼化，並使用資料採礦技術尋找其特徵規則。

本研究從軌跡序列編碼的觀點取代原本的軌跡純粹座標資料，重新詮釋橈足類和纖毛蟲互動軌跡的狀況，關於橈足類和纖毛蟲互動軌跡若以純量化形式表現的話，將是十分龐大的資料量，而且有相似行為被分成不同特徵的問題，所以本研究將兩者軌跡的座標及時間等量化資料對映到兩者的移動行為描述，藉使用軌跡序列編碼來分析這個議題，並用讓人能輕易理解的形式來呈現。

關於橈足類與纖毛蟲互動軌跡編碼，其完整流程如圖 3.5 所示，首先是橈足類與纖毛蟲的位置資訊，此資訊是實驗記錄影片經數化與資料處理後的軌跡資料，此軌跡資料是以每 0.033 秒為單位記錄橈足類與纖毛蟲的座標數據，雖然橈

足類與纖毛蟲的活動都是在連續時間下進行，但量化過程中會將原本連續時間切割成連續時間片段，以這些連續時間片段為基礎，並根據橈足類存在於觀測畫面中的時間為標準，將橈足類與纖毛蟲互動軌跡分成多個時間區段，在每個時間區段內再進行每 0.5 秒為單位的時間窗切割，轉換原本橈足類與纖毛蟲的座標資料成為其所在的空間區域與互動狀態，最後產生橈足類與纖毛蟲的互動移動軌跡序列編碼，在此編碼流程中細節部份的說明將在下文中介紹。

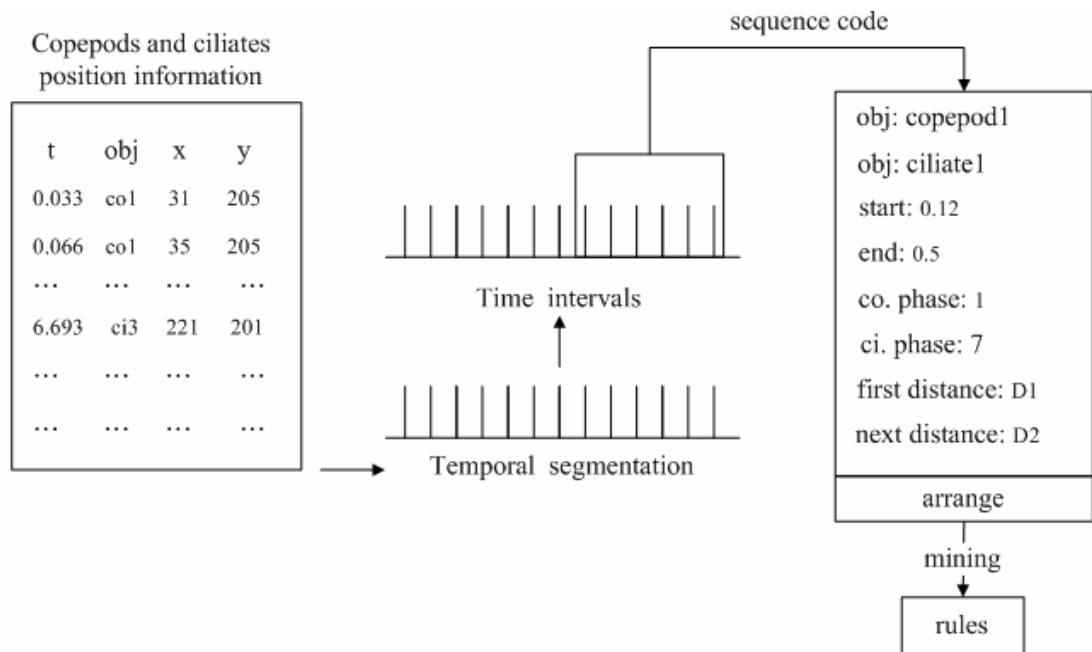


圖 3.5 橈足類和纖毛蟲互動軌跡的序列編碼生成

針對橈足類和纖毛蟲互動議題，橈足類及纖毛蟲的位置也可能會影響其互動，但因空間座標位置很難準確地重複在移動特徵實例上，直覺的想法是將空間位置轉換成空間區域(Cao et al., 2005)，本研究使用網格切割影片的所記錄的橈足類及纖毛蟲活動空間，網格的數目為使用者自訂的參數，本研究參考橈足類的體積大小，希望讓一個網格至少要足夠容納一隻橈足類的活動，從而訂出網格數目為 9 個。此 9 格網格對映觀測影片的畫面，是具有上下的垂直關係，而非水平關係，所以網格 1、2、3 是處在最高的區域，網格 4、5、6 次之，網格 7、8、9 則在最底下的區域，如圖 3.6 所示。

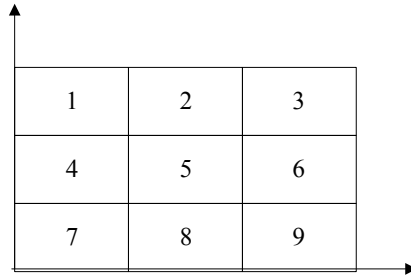


圖 3.6 空間區域示意圖

橈足類及纖毛蟲出現在觀測影片上的時間不固定，本研究以橈足類出現在觀測畫面上為開始到橈足類消失於畫面時為結束，此一時間範圍稱為一時間區段 (time interval)，每一個時間區段長度並不一樣，時間區段的長短依賴於觀測畫面中橈足類的存在時間。每個時間區段經過時間的切割，以每隔 0.5 秒進行之，此一分割的時間長度稱為時間窗(time window)，如圖 3.7，每一個時間窗會包含當時在觀測畫面上所有橈足類及纖毛蟲的片段軌跡，它的功用是將原本一長串的序列進行切割來簡化過長的序列，如此一來將比較方便兩時間點的橈足類及纖毛蟲互動分析。

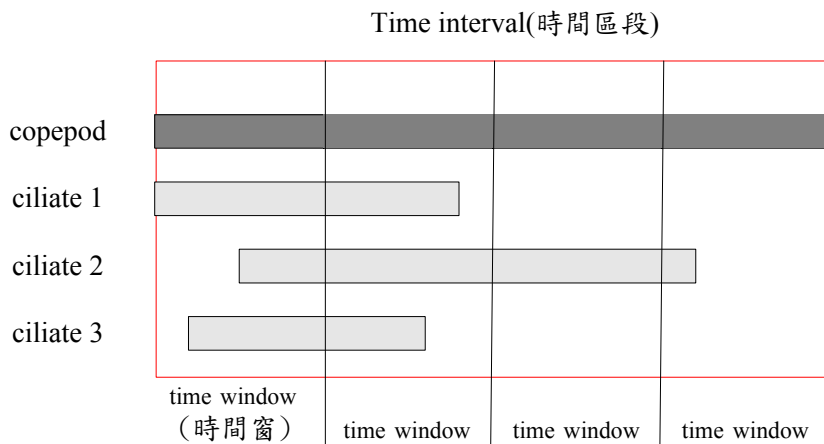


圖 3.7 時間區段示意圖，以橈足類存在時間作為時間區段的依據，並以 0.5 秒進行時間窗的切割。

本研究使用以下五個參數進行橈足類及纖毛蟲的互動軌跡編碼，是想藉此了解橈足類及纖毛蟲的所在空間區域對其游泳行為是否有影響，所以在編碼中放入兩者空間區域、距離與互動狀態，並希望知道橈足類進行互動行為時的軌跡變化

情形，故也放入橈足類 NGDR 於編碼中，從而組成本研究的橈足類及纖毛蟲互動編碼。

- 橈足類空間區域：現在時間窗中的橈足類所在的空間區域。
- 纖毛蟲空間區域：現在時間窗中的纖毛蟲所在的空間區域。
- 橈足類與纖毛蟲的互動狀態：本研究設定五種互動狀態來表示橈足類與纖毛蟲兩者的互動行為，分別是接近(approach)、離開(depart)、會面(meet)、錯失(miss)和不變(constant)。
- 距離(mm)：橈足類及纖毛蟲的相對距離數值。
- NGDR：在一個時間窗中橈足類軌跡的 NGDR 值，用來衡量橈足類在此時間範圍的游泳行為。

關於橈足類游泳情形根據研究者的目的有不同分類法，Cowles & Strickler(1983)是分為慢速游泳、中斷(break)、清除活動(cleaning activity)和快速游泳；van Duren & Videler(1996)分成游泳、靜止(still)、不可見(not visible)和跳躍(hop)，本研究是根據對橈足類與纖毛蟲的距離變化進行互動狀態的分類，接近狀態是指橈足類與纖毛蟲之間的距離在經過一個時間窗(0.5 秒)後有顯著縮短；離開狀態是說橈足類與纖毛蟲之間的距離在經過一個時間窗後有明顯增加；不變狀態則是指橈足類與纖毛蟲之間的距離在經過一個時間窗沒有什麼明顯的變化，但 2D 攝影方式可能把原本真實情形(3D)的接近或離開事件記錄成不變狀態；會面狀態的定義是橈足類與纖毛蟲雙方處在十分接近的距離，此距離大小參考 Broglio et al.(2001)所測量到的橈足類與纖毛蟲成功捕捉距離(0.52mm)及錯失距離(0.81mm)；而錯失狀態則是要在之前是會面狀態的前提下，而下一個時間窗纖毛蟲依舊存在，顯示橈足類在相當接近獵物的情況下沒有成功捕捉獵物，所以此情形是錯失狀態。

互動狀態不只本研究定義的這五種，例如：獵物被捕獲狀態，橈足類已偵測到纖毛蟲並成功捕獲，也是很重要的互動情形，但以本研究分析的軌跡座標資料

及受 2D 攝影等因素限制下，很難對此狀態進行區分，故本研究並沒有進行纖毛蟲被捕獲狀態的分析。根據以上橈足類與纖毛蟲的所在區及狀態等等參數的定義，本研究把一個時間窗中的橈足類與纖毛蟲互動關係表示成以下的行為編碼。

橈足類所在區域	纖毛蟲所在區域	互動狀態	距離	NGDR
---------	---------	------	----	------

圖 3.8 互動軌跡編碼

在一時間區段中橈足類與纖毛蟲出現的數目並不固定，經過時間窗分割後其數目相對關係可能為一對一、一對多、多對一或多對多，所以橈足類與纖毛蟲的相對距離必須考慮整體數目狀況，以圖 3.9 情況進行說明，在某時間窗中有橈足類 1 隻與纖毛蟲 3 隻，那就必須計算 3 次相對距離，並記錄當時橈足類與纖毛蟲各自的所在區以及橈足類的 NGDR，經過整理出來的橈足類與纖毛蟲軌跡描述編碼資料會呈現表 3.4 的形式，分別為單隻橈足類對三隻纖毛蟲的編碼情形，而實際處理編碼的情形是根據畫面中橈足類出現至消失的時間定義為一時段，這一時段可分割為數個時間窗，每一個時間窗的編碼如表 3.4 所示，組合所有時間窗的編碼就是某時段中的橈足類與纖毛蟲互動序列編碼，如表 3.5 所示。

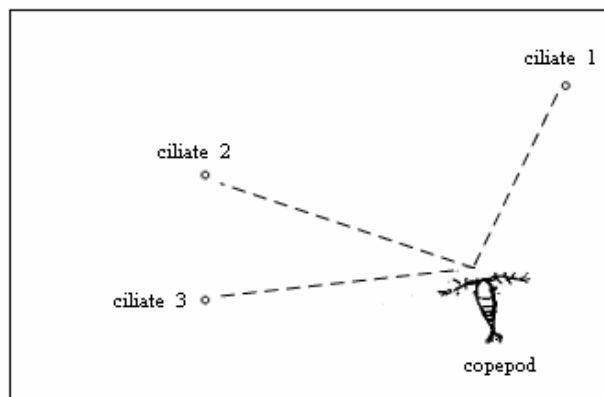


圖 3.9 橈足類與纖毛蟲相對關係示意，虛線部分為相對距離

表 3.4 時間窗中以橈足類為觀察主體與纖毛蟲互動軌跡編碼

在某時間窗中的橈足類與纖毛蟲	時間窗中的序列編碼
Copepod- Cilate1	(9, 3, depart, 0.86805, 0.532)
Copepod- Cilate2	(9, 4, approach, 0.937494, 0.532)
Copepod- Ciliate3	(9, 7, approach, 0.9444384, 0.532)

表 3.5 時間區段中以橈足類為觀察主體與纖毛蟲互動軌跡編碼

在某時間區段中橈足類與纖毛蟲	時間區段中的序列編碼
Copepod- Cilate1	(9, 3, depart, 0.86805,0.532) (8, 3, depart, 1.0138824,0.574) ... (8, 3, depart, 1.0624932, 0.602)
Copepod- Cilate2	(9, 4, approach, 0.937494, 0.532)(8, 4, approach, 0.833328 ,0.574) ... (8, 4, approach, 0.7013844, 0.602)
Copepod- Ciliate3	(9, 7, approach, 0.9444384, 0.532) ... (8, 7, approach, 0.6388848, 0.574)

### 3.4 資料採礦技術

資料採礦是一種自動化探索大量資料中 useful 且創新資訊或特徵的技術(Tan et al., 2005)。本研究將橈足類與纖毛蟲互動軌跡進行編碼後，運用資料採礦技術進行分析期望找到這些資料中關於橈足類與纖毛蟲互動特徵。

- 關聯法則(association rule)

關聯法則在探索隱藏在大量資料中令人感興趣的關係時十分有用，其形式通常表現成  $X \rightarrow Y$ ， $X$  稱為前項項目集， $Y$  稱為後項項目集， $X$  和  $Y$  是互相無關聯的項目集(disjoint itemsets)，即  $X \cap Y = \emptyset$ 。欲測量一條關聯法則的強度可透過支持度(support)和信賴度(confidence)進行衡量。法則  $X \rightarrow Y$  的支持度是指同時包含  $X$  與  $Y$  的交易次數百分比，信賴度是說在所有  $X$  的交易中又有  $Y$  的交易機率(Tan et al., 2005)。



$$\text{Support, } s=(X \rightarrow Y) = \frac{\sigma(X \cup Y)}{N} \dots\dots\dots(12)$$

$$\text{Confidence, } c=(X \rightarrow Y) = \frac{\sigma(X \cup Y)}{\sigma(X)} \dots\dots\dots(13)$$

其中 N 是總交易數， $\sigma(X)$  表示支持個數(support count)被定義為支持項目集 X 的交易(transaction)總數，以表 3.5 為例，{B,C,D} 的支持個數等於 2，因為所有交易中只有 2 筆交易包含 {B,C,D} 3 個項目。

表 3.6 交易資料

TID	items
1	A,B
2	A,C,D,E
3	B,C,D,F
4	A,B,C,D
5	A,B,C,F

對關聯法則來說，找到的法則必須使支持度  $\geq$  最小支持度，且信賴度  $\geq$  最小信賴度，即滿足最小支持度、最小信賴度的門檻。以表 3.6 為例，若定義最小支持度與最小信賴度均為 50%，有關法則  $A \rightarrow B$  的支持度為  $4/5=80\%$ ，信賴度為  $3/4=75\%$ ，均大於最小支持度與最小信賴度。

● 群集分析(cluster analysis)

群集分析主要是將資料分割成有意義的不同群集，此動作稱為分群 (clustering)，通常群集分析對目的而言是一個有用開始點，像是資料的摘要。關於分群演算法中最古老也是最廣泛被運用的是 k-means 演算法，有關演算法的流程如表 3.7 所示，首先選擇 k 個初始質心(centroid)，此 k 值為使用者自訂參數，即使用者想要得到的群集數目，每個資料點將被分配到最接近的質心，這些被分配到質心的資料點集合稱為一個群集，接下來依據被分配到質心的資料點，更新每個群集的質心，而此重複分配與更新的步驟直到沒有任何資料點改變其群集，或是說直到質心都維持相同時停止演算(Tan et al., 2005)。

表 3.7 k-means 演算法

1. 選取 k 點作初始質心
2. 重複
3. 分配每個資料點到最接近的質心
4. 更新每個群集的質心
5. 直到質心不再變化

● 決策樹(decision tree)

決策樹是一種分類程序(classification procedure)的演算法，所謂的分類技術是分配物件到好幾個預先定義好的類別中的一類的工作(Friedl & Brodley, 1997)，而決策樹則是分類的其中一種技術，它主要是將資料集合以遞迴方式切割成愈來愈具有同質性的次集合，其結構會呈現樹狀結構，由根節點、中間節點、終點節點組成，如圖 3.10 所示，根節點由所有資料組成，它沒有任何輸入，而輸出可以是零或多個輸出；中間節點是分割的資料集，它會有一個輸入與兩或多個輸出；終端節點或稱葉節點，會有一個輸入與沒有任何的輸出(Tan et al., 2005)。

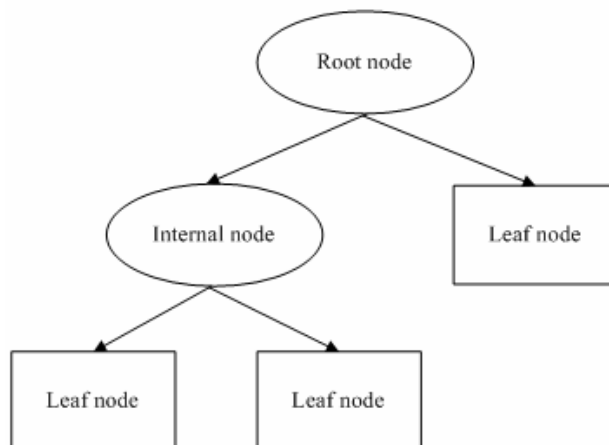


圖 3.10 決策樹結構圖

決策樹演算法版本甚多，本研究所選擇的是 J48 演算法，此演算法是根據 Quinlan(1993)的決策樹分類法 C4.5 所改進而成，本研究以 J48 來進行資料分析，它以樹狀結構展開，從根節點開始到葉節點結束，由上到下產生讓人便於理解的法則。由決策樹的樹狀分枝結構來看，不管以哪種屬性來產生子節點通常都會讓子節點不純淨(impurity)，故在樹成長時必須考慮其分割(split)盡量使子節點較純

淨，對此的測量通常是使用熵(Entropy)來表示(Tan et al., 2005)。

$$Entropy(t) = -\sum_{i=0}^{c-1} p(i|t) \log_2 p(i|t) \dots\dots\dots (14)$$

t是指資料集，i是指類別(class)， $p(i|t)$ 是指類別i對資料的切分率，即類別i在資料集t所占的比率，c為類別數目。Entropy即為熵，常被視為亂度或不確定度的測量，亂度越高就越無規則，決策樹演算法就是想要降低資料分類結果的亂度(Tan et al., 2005)，以C4.5為基礎的演算法要決定最好的切割必須考慮到結果所產生的切割數目，藉使用增益比率(gain ratio)達到此目的，其中 $\Delta_{info}$ 稱為資訊增益(information gain)，式子如下：

$$Gain\ ratio = \Delta_{info} / split\ info \dots\dots\dots (15)$$

$$\Delta_{info} = Entropy(p) - \sum \frac{n_i}{N} Entropy(i) \dots\dots\dots (16)$$

$$split\ info = -\sum_{i=1}^k P(v_i) \log_2 P(v_i) \dots\dots\dots (17)$$

k為全部分割的數目，根據公式(17)若一個屬性會產生很多分割的話，那它的切割資訊(split info)將會很大，而導致增益比率減少，所以要藉由比較各屬性的增益比率，挑選具有最高增益比率的項目來當做分割的依據，以此為原則決策樹將成長完成。

本研究使用 Weka(Waikato Environment for Knowledge Analysis)這套軟體進行資料採礦的工作，Weka 是由紐西蘭的 Waikato 大學所開發，它提供資料前處理、分類、迴歸、分群、關聯法則和視覺化等功能(Witten & Frank, 2005)，本研究所使用功能為此軟體所提供決策樹 J48 演算法與關聯法則，配合先前所完成的橈足類與纖毛蟲軌跡序列編碼的資料，藉運用決策樹與關聯法則技術分析，希望在此資料中找出一些橈足類與纖毛蟲互動的特徵，而這些特徵是用指標測量所無法得到的。

## 第四章 研究成果

本研究使用運動型指標測量橈足類及纖毛蟲的游泳軌跡，並將原本軌跡轉換軌跡序列編碼的資料採礦的技術來發掘橈足類及纖毛蟲在不同環境下互動的行為特徵，本章說明橈足類及纖毛蟲軌跡的指標測量與資料採礦的分析結果。

### 4.1 指標分析

關於指標分析的部分使用兩種方式進行橈足類和纖毛蟲的軌跡分析，(1)對橈足類游泳軌跡進行基本類型的區分，並使用運動型指標測量之；(2)在互動實驗部分使用運動型指標測量橈足類和纖毛蟲全體軌跡，並分別探討橈足類和纖毛蟲的分析結果，經統計分析發現多數指標呈現非常態分布(K-S test,  $p < 0.01$ )，故本研究對於不同環境的軌跡資料的相關統計分析是使用 Mann-Whitney U test，進行檢定兩母體分配是否相同(Strom & Buskey, 1993；van Duren & Videler, 1995；Seuront et al., 2004a)。

#### 4.1.1 軌跡分析

橈足類游泳行為雖然十分多變，如圖 4.1a 所示，但還是可從軌跡圖歸納出一些基本特徵，本研究橈足類軌跡從視覺定義的角度區分出四種橈足類游泳特徵(Seuront et al., 2004a；Schmitt et al., 2006)，分別為鋸齒型、下沉型、環型和擴散型，如圖 4.2a、b、c 和 d 所示，多數橈足類游泳軌跡都是由此四種游泳特徵所組成，如圖 4.1a 的軌跡都能拆解成基本的四種游泳特徵。

對此四種基本游泳特徵，本研究運用運動型指標進行測量，鋸齒型的特徵如圖 4.2a 所示，大都呈現水平方向移動，鋸齒狀軌跡的形成根據影片觀測應該是橈足類進行跳躍所致，此特徵的動能約  $3.96E-13$  焦耳是四種基本游泳特徵中最高的，高動能軌跡可能是因進行跳躍所形成；下沉型的特徵通常是在垂直方向進行由上至下緩慢的移動，如圖 4.2b 所示，其 NGDR 為 0.64，比鋸齒型 NGDR 為 0.502 更接近直線運動，動能  $4.55E-15$  焦耳在四種游泳特徵中是最低值，推測浮游動物進行下沉行為可能是為保存能量(Yen, 2000)；環型的游泳特徵可能是橈足

類專注在某一區域，導致其軌跡會形成環狀，如圖 4.2c，順時鐘或逆時鐘方向的游泳行為都曾觀測到；擴散型的軌跡十分曲折，如圖 4.2d，其碎形維度值 1.0848 是四種游泳特徵中最高的，表示其路徑是四種特徵中最複雜的，而轉彎程度也是四種特徵中最大的，也顯示橈足類擴散型游泳方向變化最多，四種特徵的詳細指標測量值可見表 4.1。

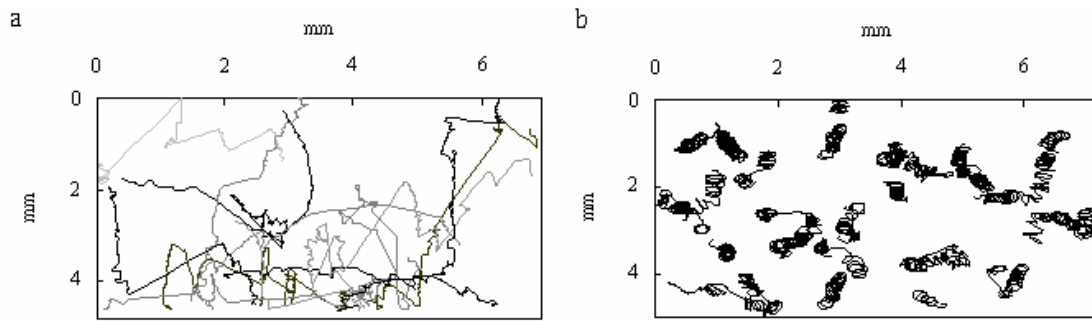


圖 4.1 a 橈足類 2D 游泳軌跡，其特徵十分多樣，b 纖毛蟲 2D 游泳軌跡，其型態單純，旋轉的特徵相當明顯

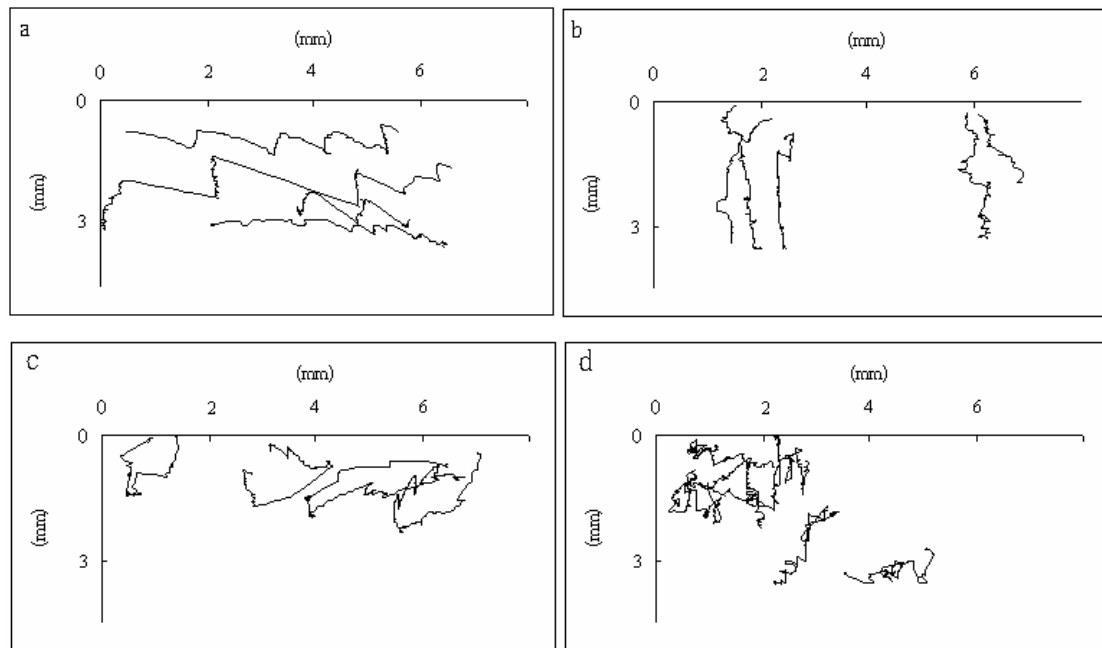


圖 4.2 橈足類 2D 游泳軌跡之四種類型，a 鋸齒型、b 下沉型、c 環型和 d 擴散型

表 4.1 四種游泳特徵的指標測量平均值

游泳特徵	NGDR	轉彎程度	動能(J)	擴散係數 (mm <sup>2</sup> /s)	碎形維度
鋸齒型	0.502	0.31	3.96E-13	-	1.0585
下沉型	0.647	0.4	4.55E-15	-	1.0379
環型	0.089	0.374	1.64E-13	-	1.0422
擴散型	0.158	0.429	2.01E-13	1.917	1.0848

(註：上表中”擴散係數”欄位中，除游泳特徵是擴散型外，其他三類型並不符合擴散行為的定義，故不進行擴散係數的運算。)

以上敘述的四種游泳特徵是基本分類，雖然資料中有些游泳軌跡單純是屬於基本型的特徵，但通常完整的橈足類游泳軌跡會比較複雜，可能會包含多種基本型特徵混合而成，纖毛蟲的游泳軌跡則是因絕大多數都是呈不斷旋轉的路徑，如圖 4.1b 所示，本研究並沒有特別對其游泳軌跡進行分類。

#### 4.1.2 互動實驗分析

運用運動型指標完整地測量橈足類與纖毛蟲在有互動及無互動狀況下的軌跡，將以橈足類與纖毛蟲兩種不同觀察主體，進行運動型指標分析結果的敘述，各項實驗代號與說明如表 4.2 和表 4.3，而各項實驗的比較流程如圖 4.3 所示。

表 4.2 以橈足類為觀察主體代號示意

代號	說明
Co	只有橈足類存在時，使用指標測量其游泳行為
Co_A	環境中有藻類存在，使用指標測量橈足類的游泳行為
Co_Ci_A(1)	環境中存在有藻類、纖毛蟲的情形下，使用指標測量橈足類的游泳行為
Co_Ci_A(2)	Co_Ci_A(1)的重複實驗

表 4.3 以纖毛蟲為觀察主體代號示意

代號	說明
Ci_A	環境中有藻類存在，使用指標測量纖毛蟲的游泳行為
Ci_Co_A(1)	環境中存在有藻類、橈足類的情形下，使用指標測量纖毛蟲的游泳行為
Ci_Co_A(2)	Ci_Co_A(1)的重複實驗

(註：為避免混淆觀察的對象，表 4.2 和表 4.3 代號的位置順序有其意義，出現在代號中第一位置的是觀察主體，以表 4.2 Co\_Ci\_A(1)為例，第一位置是 Co，表示本次想觀察的目標是橈足類。)

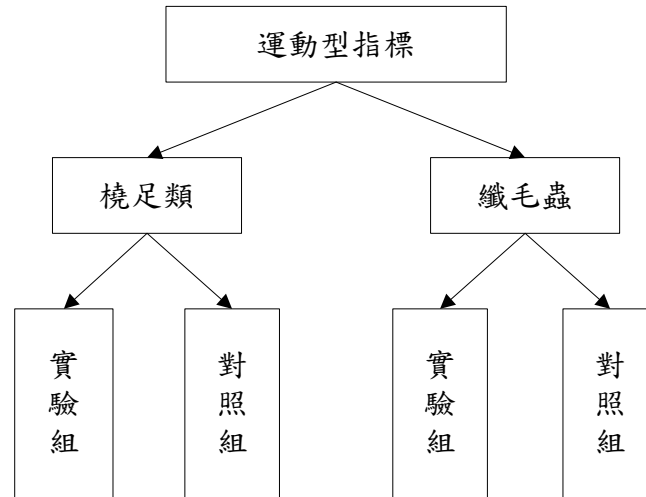


圖 4.3 橈足類與纖毛蟲比較流程，運用運動型指標分別分析橈足類與纖毛蟲的不同實驗情形。

- NGDR -橈足類為觀察主體

對照組 Co 與 Co\_A 的 NGDR 值在較低數值位置有峰值存在，如圖 4.4a 及圖 4.4b，橈足類在這兩種環境的 NGDR 趨勢相當類似，沒有存在顯著差異 (Mann-Whitney U-test,  $p > 0.01$ )，顯示藻類對橈足類游泳軌跡並沒有顯著影響。實驗組 Co\_Ci\_A(1)及 Co\_Ci\_A(2)與對照組 Co 與 Co\_A 的 NGDR 進行比較，如圖 4.4a、b、c 和 d 所示其中存在有明顯的差異，Co\_Ci\_A(1)及 Co\_Ci\_A(2)的 NGDR 峰值坐落於中間值位置而 Co 與 Co\_A 的 NGDR 峰值在左方位置，兩組結果經檢定後存在顯著的不同 (Mann-Whitney U-test,  $p < 0.01$ )，與對照組進行比對，藻類與纖毛蟲對橈足類而言，後者才是影響橈足類軌跡的原因 (Jonsson & Tiselius, 1990)，橈足類在有纖毛蟲存在的環境中有部份軌跡 NGDR 甚高，代表橈足類在此環境中部份游泳軌跡接近直線，類似彈道型移動，在掠食者-獵物互動時，彈道型移動有助於產生高相遇率，對掠食者橈足類而言是有利於捕食獵物 (Visser & Kiørboe, 2006)。

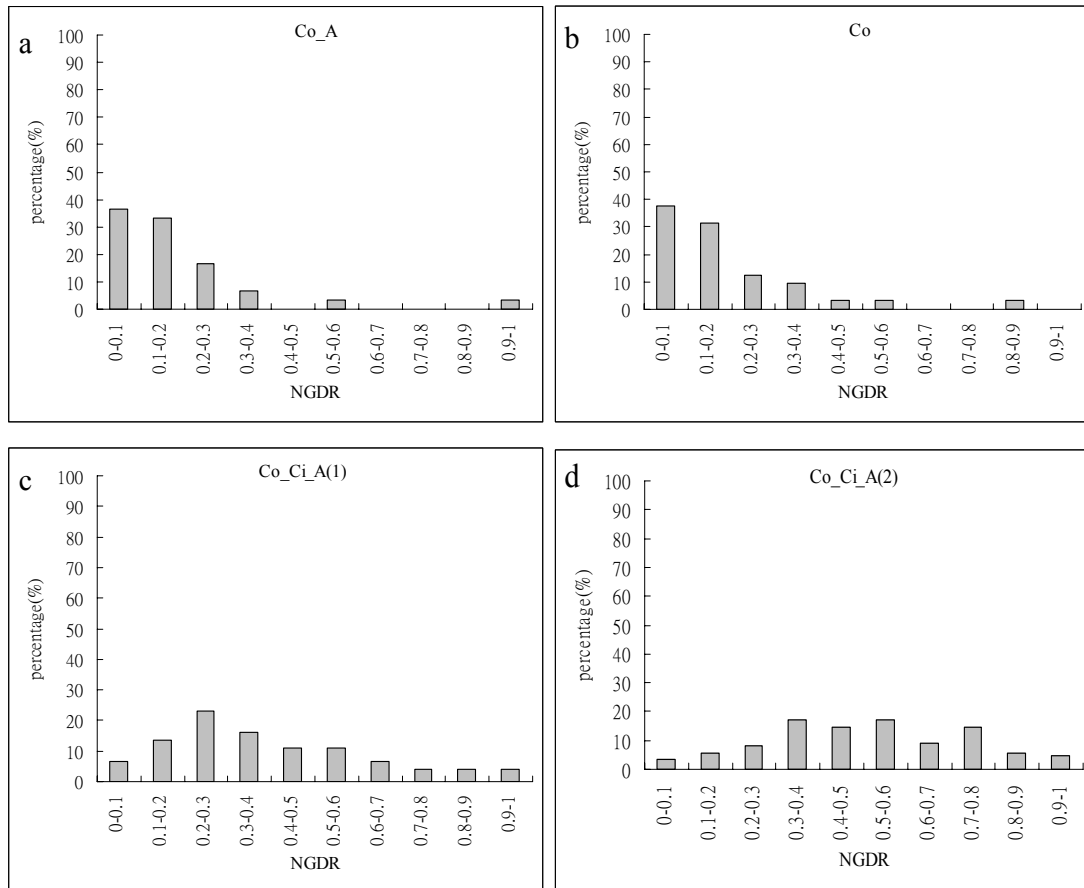


圖 4.4 橈足類的 NGDR 百分比分配圖，a 為 Co\_A、b 為 Co、c 為 Co\_Ci\_A(1) 和 d 為 Co\_Ci\_A(2)，因為實驗組與對照組軌跡數目並不一致，為方便實驗組與對照組比較，所以圖形 Y 軸使用百分比取代次數分配值，呈現出不同 NGDR 軌跡所佔的比例。

● NGDR-纖毛蟲為觀察主體

環境中有無存在掠食者對纖毛蟲的行為影響甚大，在不具掠食者環境中，如圖 4.5a 所示，纖毛蟲 NGDR 值大都落在極低數值的地方，其中 0~0.1 的範圍包含 80%以上的軌跡數，反之具有掠食者環境的纖毛蟲情形則呈現相當大的差異 (Mann-Whitney U-test,  $p < 0.01$ )，如圖 4.5b 和圖 4.5c 所示，與圖 4.5a 比較落於極低數值位置的 NGDR 比率大幅下降，而中高數值位置的比率明顯上升，此說明在沒有掠食者干擾的環境，纖毛蟲軌跡都屬於極度扭曲的狀況，而環境中有掠食者時，纖毛蟲會進行類似直線運動，且比例並不低，才會得到圖 4.5b 與圖 4.5c 的結果。



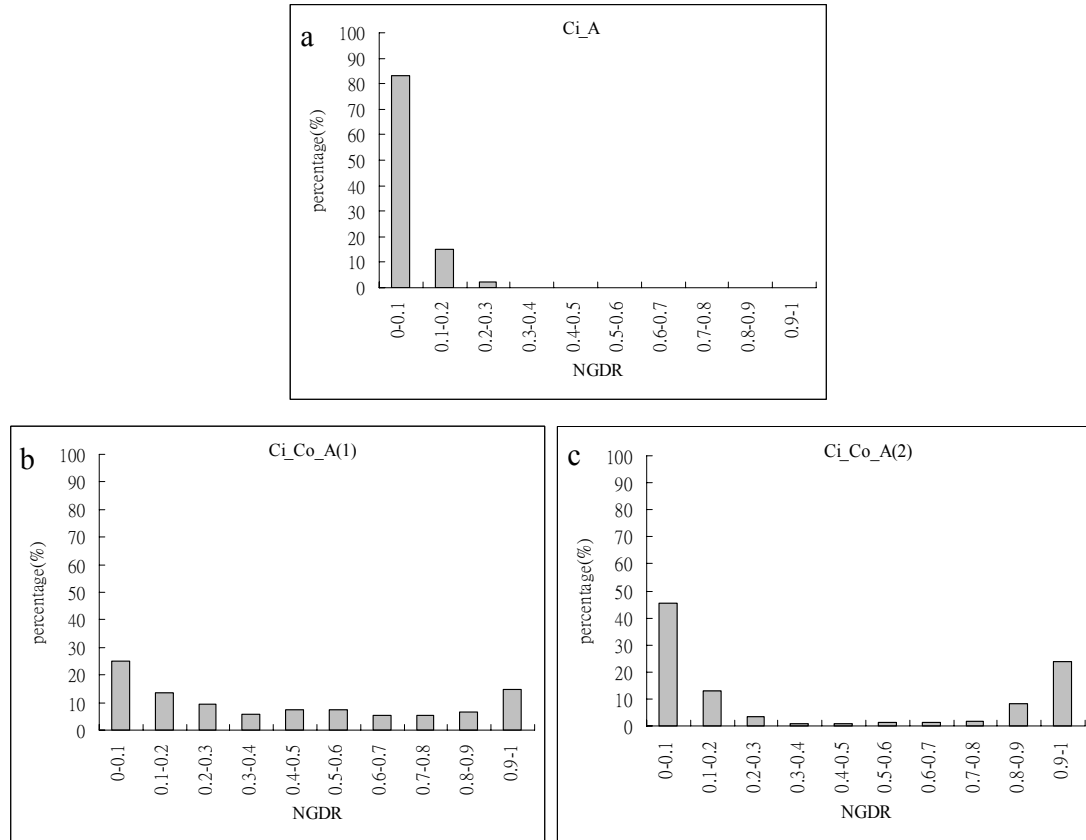


圖 4.5 纖毛蟲的 NGDR 百分比分配圖，a 為 Ci\_A、b 為 Ci\_Co\_A(1)和 c 為 Ci\_Co\_A(2)。

● 轉彎程度-橈足類為觀察主體

橈足類軌跡經轉彎程度測量後，整理成圖 4.6a、b、c 和 d。若環境中不存在獵物纖毛蟲時，橈足類的轉彎程度值多集中於 0.5~0.8 間，如圖 4.6a 和 b 所示，此二圖所呈現的橈足類轉彎程度的趨勢相當類似，就兩對照組狀況而言，藻類存在與否並不影響橈足類轉彎行為(Mann-Whitney U-test,  $p>0.01$ )。環境中存在獵物纖毛蟲時，橈足類的轉彎程度值下降至 0.2~0.6 的範圍，與先前 0.5~0.8 的範圍明顯不同(Mann-Whitney U-test,  $p<0.01$ )，顯示在有纖毛蟲環境中，橈足類傾向進行較小角度的轉彎行為，浮游動物於不同食物濃度環境中的有不同轉彎特徵，有些在高食物濃度會有較小的轉彎角度，有些則是在低食物濃度轉彎角度較小(Dodson et al., 1997)，本實驗的橈足類轉彎特徵類似前者，在低食物濃度轉彎角度較大，高食物濃度則轉彎角度較小。

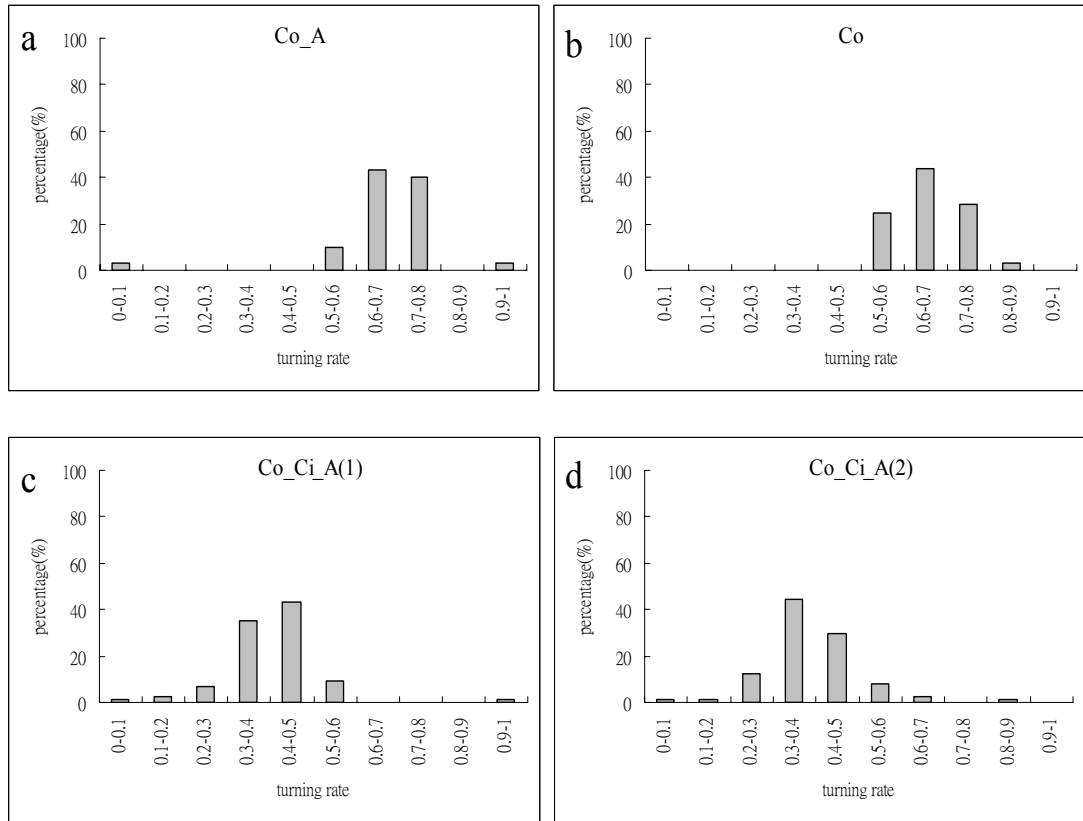


圖 4.6 橈足類的轉彎程度百分比分配圖，a 為 Co\_A、b 為 Co、c 為 Co\_Ci\_A(1) 和 d 為 Co\_Ci\_A(2)，將 x 軸轉彎程度分成 10 等份，呈現不同轉彎程度軌跡所佔的比例。

為更方便且精確了解有機體轉彎的角度分布，不僅使用上述的轉彎程度指標，本研究對橈足類軌跡中的轉彎行為以角度的方式呈現，如圖 4.7 所示，讓橈足類游泳軌跡轉彎角度在 180° 半圓圖配合次數百分比呈現，可發現實驗組與對照組的角度差異，在未受干擾環境下橈足類轉彎角度多在 120° 附近，而在互動環境下的橈足類轉彎角度則集中於 75° 左右。

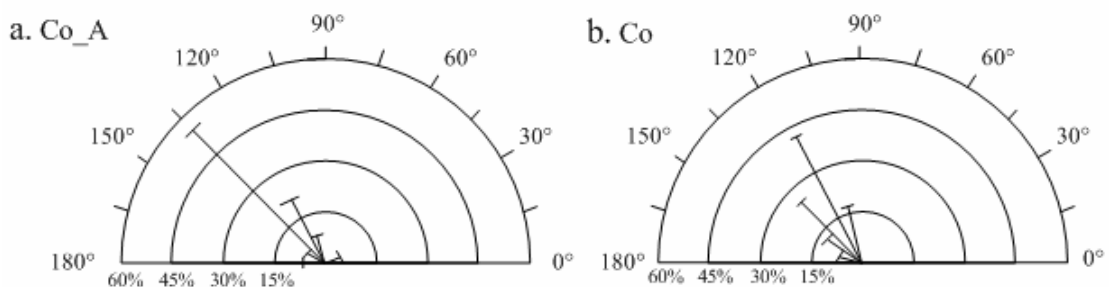


圖 4.7 橈足類的轉彎角度百分比分配圖，a 為 Co\_A 和 b 為 Co

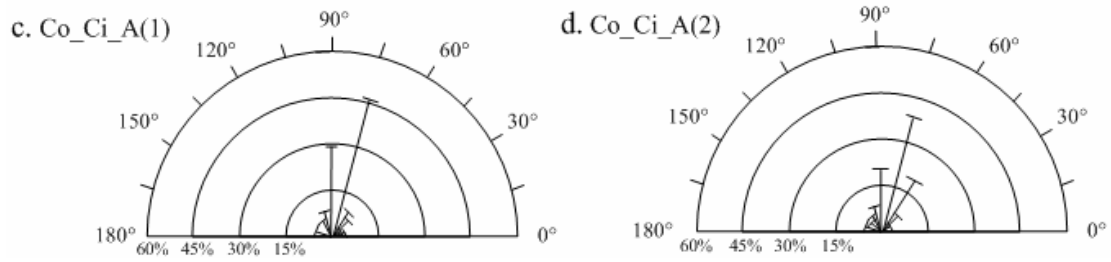


圖 4.7 橈足類的轉彎角度百分比分配圖，c 為 Co\_Ci\_A(1)和 d 為 Co\_Ci\_A(2)

● 轉彎程度-纖毛蟲為觀察主體

比較纖毛蟲在有無掠食者情況下的轉彎行為，可參考圖 4.8a、b 和 c，可發現無掠食者環境的纖毛蟲轉彎程度值集中在中低數值位置(0.2~0.5)，與有掠食者環境的纖毛蟲轉彎程度值分布於 0.2~0.9 範圍間的情形不相似(Mann-Whitney U-test,  $p < 0.01$ )，與先前橈足類在不同環境的轉彎程度情形相反，纖毛蟲在無掠食者時，其游泳行為的轉角較小，而環境中存在掠食者時，其游泳行為的轉角會較大。浮游動物的轉彎行為會讓該浮游動物遠離擾動來源(the source of a perturbation) (Buskey et al., 2002)，在掠食者-獵物互動環境下的纖毛蟲可能就是 要遠離橈足類而進行大角度的轉彎行為。

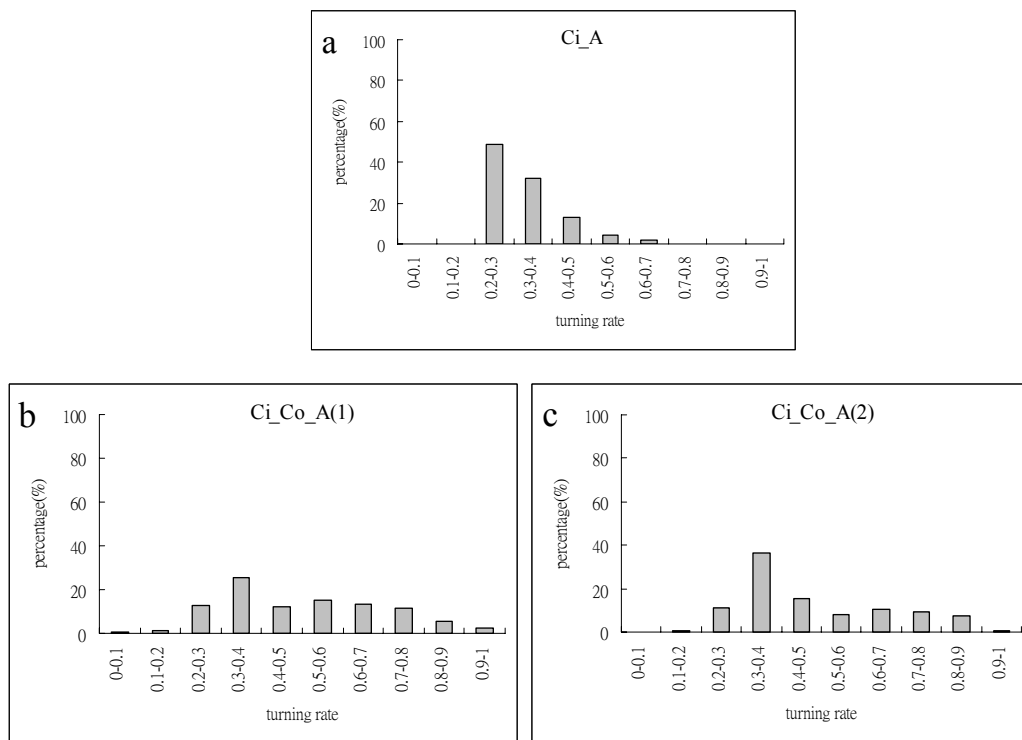


圖 4.8 纖毛蟲的轉彎程度百分比分配圖，a 為 Ci\_A、b 為 Ci\_Co\_A(1)和 c 為 Ci

\_Co\_A(2)。

關於纖毛蟲轉彎角度分布，如圖 4.9 所示，在未受干擾環境中，纖毛蟲轉彎角度多集中於 60° 附近，在有互動環境下，纖毛蟲轉彎角度沒有明顯集中於某特定角度，但還是可看出在 90° 以下的角度佔多數。

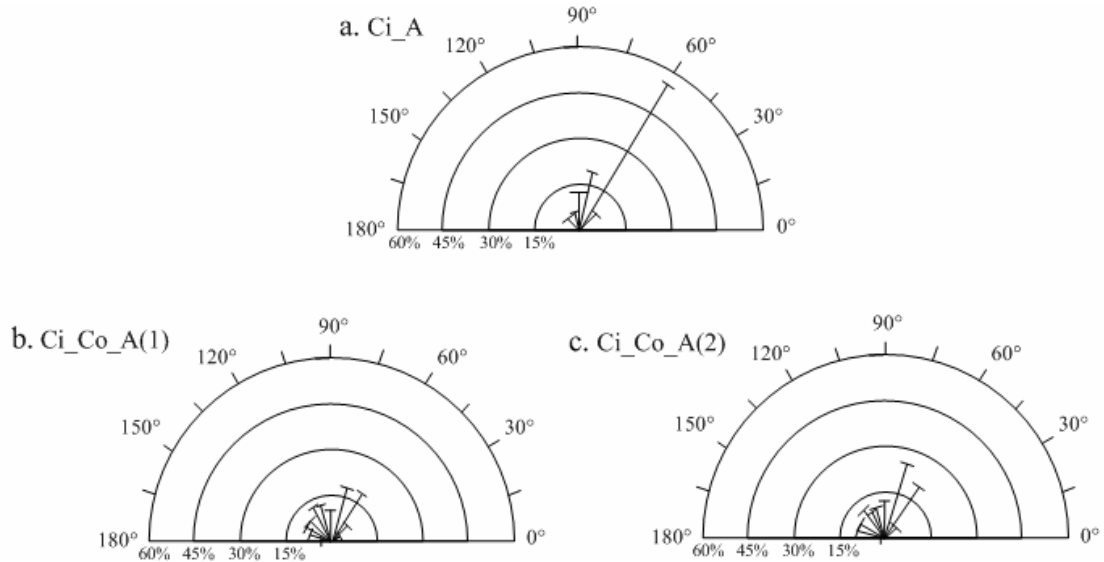


圖 4.9 纖毛蟲的轉彎角度百分比分配圖，a 為 Ci\_A、b 為 Ci\_Co\_A(1) 和 c 為 Ci\_Co\_A(2)。

● 擴散係數-橈足類為觀察主體

根據擴散係數公式  $D = \frac{R^2}{4T}$ ，擴散係數與單位時間內的移動量有關，若浮游動物進行擴散行為時單位時間內移動量越多，擴散係數會越大。橈足類在無纖毛蟲存在環境(Co 與 Co\_A)的擴散係數不具顯著差異(Mann-Whitney U-test,  $p > 0.01$ )，但環境中存在有纖毛蟲時，橈足類的擴散行為明顯上升(Mann-Whitney U-test,  $p < 0.01$ )，可參考圖 4.10a、b、c 和 d。Visser & Kiørboe(2006)推論橈足類的游泳最佳策略是面對其掠食者時採取擴散行為，而面對獵物時則採取彈道型(ballistic)行為，橈足類面對其掠食者情形不在本研究實驗設計中，故不予置評，但橈足類面對獵物時的行為，本研究經 NGDR 與擴散係數分析後得到 Visser & Kiørboe(2006)對橈足類面對獵物時的行為推論可能並不完整，原因是 Visser & Kiørboe(2006)描述橈足類面對獵物時的行為是以彈道型移動有助於產生高相遇率(encounter rate)進行推論，但橈足類彈道型移動可能會耗費較多能量，提高的

相遇率與消耗的能量有權衡(trade-off)的空間，以此觀點切入橈足類面對獵物時的行為，其最佳策略應不僅僅只有彈道型移動，根據本研究先前 NGDR 指標的測量，橈足類在有獵物互動環境下，中高數值部分的 NGDR 比例上升，顯示橈足類面對獵物的確有採取彈道型行為，但擴散係數的測量則發現橈足類在此環境下也進行相當比例的擴散行為，所以橈足類面對獵物時的行為策略並不能僅以彈道型移動進行描述，其中的行為特徵可能更為複雜。

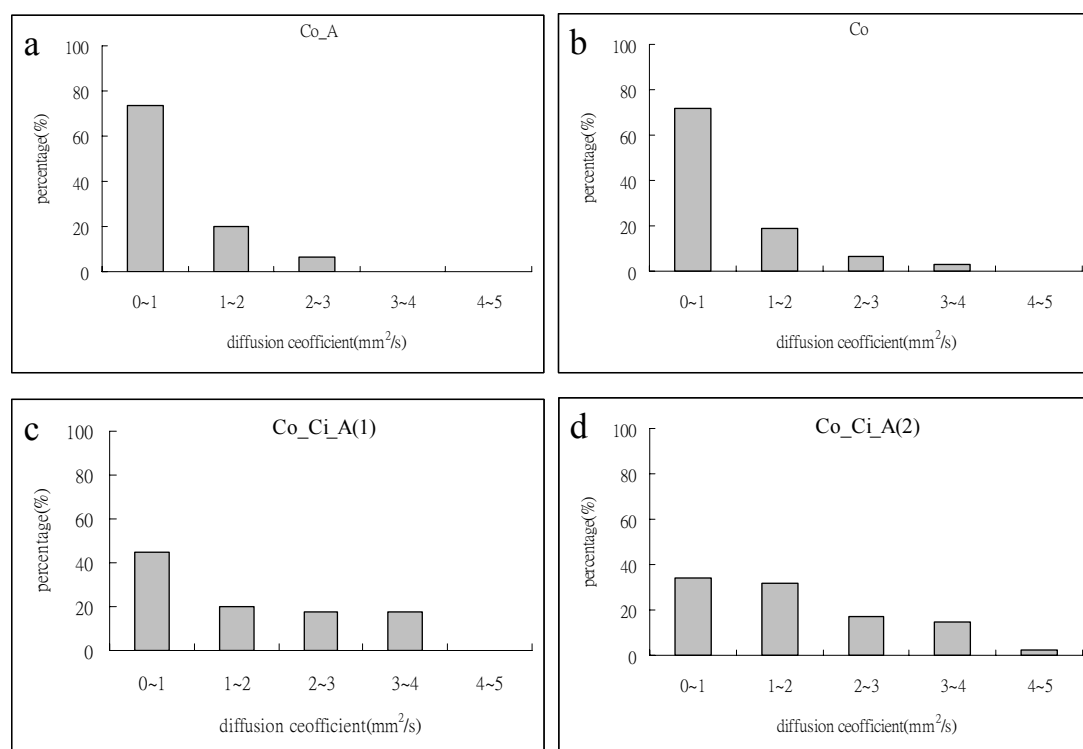


圖 4.10 橈足類的擴散係數百分比分配圖，a 為 Co\_A、b 為 Co、c 為 Co\_Ci\_A(1) 和 d 為 Co\_Ci\_A(2)，x 軸是擴散係數，Y 軸是百分比。

● 擴散係數-纖毛蟲為觀察主體

纖毛蟲的擴散係數分析與先前其他指標測量結果有所不同，其差異在於不論環境中是否存在掠食者橈足類，纖毛蟲的擴散係數並沒有顯著差異 (Mann-Whitney U-test,  $p > 0.01$ )，此意義代表擴散係數指標對於纖毛蟲的游泳行為測量上可能較不具顯著效果，或者是纖毛蟲不管環境是否有掠食者存在，其擴散行為沒有隨環境不同而產生明顯改變。

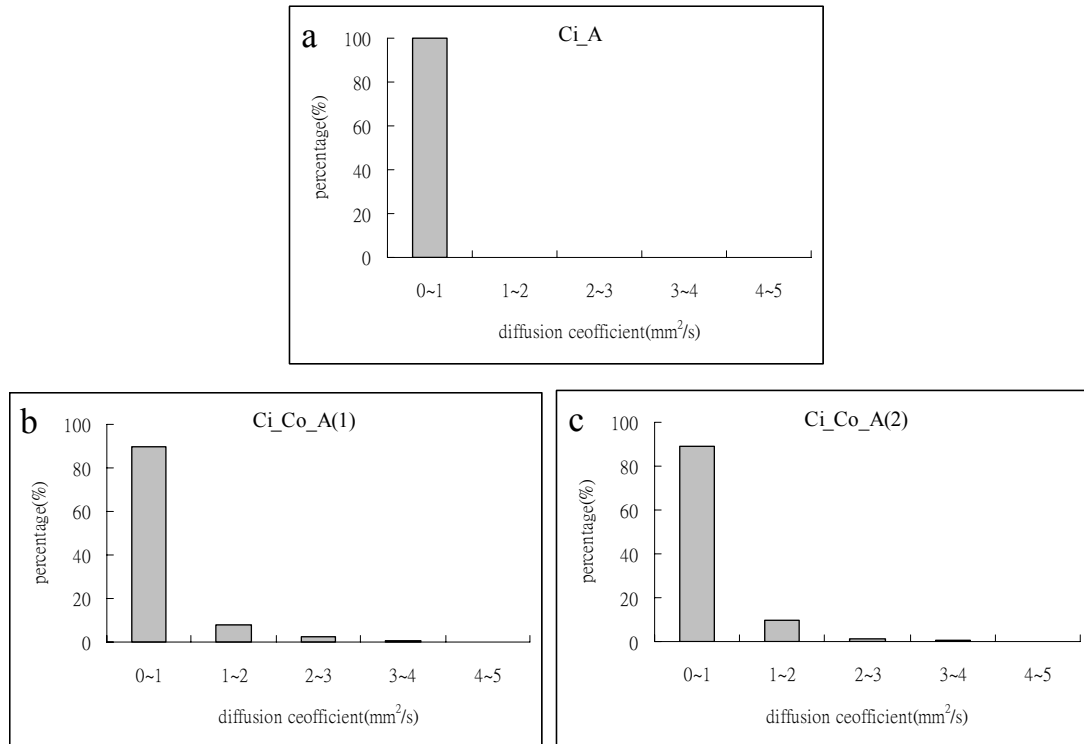


圖 4.11 纖毛蟲的擴散係數百分比分配圖，a 為 Ci\_A、b 為 Ci\_Co\_A(1)和 c 為 Ci\_Co\_A(2)，x 軸是擴散係數，Y 軸是百分比。

- 動能-橈足類為觀察主體

根據最適捕食理論(Optimal foraging theory)(Pyke, 1984)，浮游動物會預期其最佳能量需求去捕捉特定食物量，經動能指標的測量發現環境中的其他有機體對橈足類的動能有很大的影響，如圖 4.12a、b、c 和 d，不存在獵物纖毛蟲的兩組實驗 Co 與 Co\_A 的橈足類動能沒有明顯差異(Mann-Whitney U-test,  $p > 0.01$ )，動能測量值都是處於十分低的狀況，而在有獵物纖毛蟲的實驗 Co\_Ci\_A(1)與 Co\_Ci\_A(2)中的橈足類動能顯著高於對照組的數據(Mann-Whitney U-test,  $p < 0.01$ )。比較藻類與纖毛蟲對橈足類的影響，Jonsson & Tiselius(1990)指出纖毛蟲是影響橈足類軌跡的原因，本研究以動能指標測量，得到纖毛蟲才是影響橈足類能量支出(energy expenditure)的主要因子。

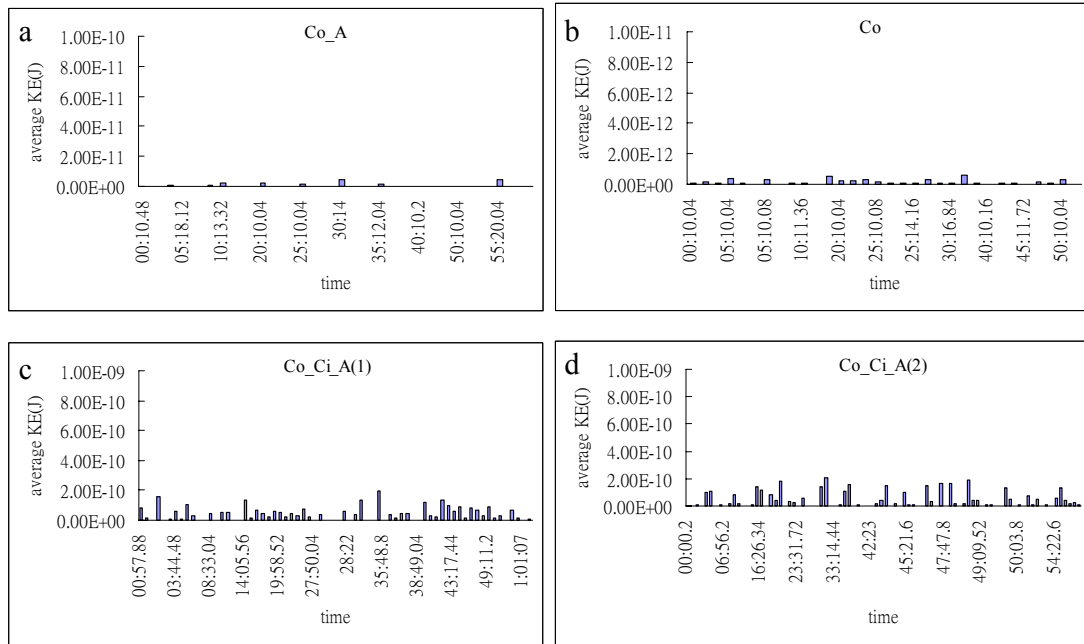
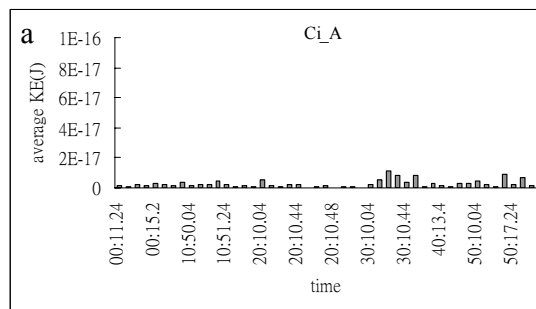


圖 4.12 橈足類的平均動能長條圖，a 為 Co\_A、b 為 Co、c 為 Co\_Ci\_A(1)與 d 為 Co\_Ci\_A(2)。

● 動能-纖毛蟲為觀察主體

纖毛蟲的動能測量結果類似橈足類的測量結果，在不具掠食者環境下，纖毛蟲平均動能  $2.71336E-18$  焦耳，而存在有掠食者環境下的纖毛蟲平均動能分別是  $1.26279E-16$  焦耳與  $1.71847E-16$  焦耳，顯示纖毛蟲在有掠食者存在時，比起沒有掠食者威脅時會花費較高的能量(Mann-Whitney U-test,  $p < 0.01$ )，見圖 4.13b 和 c 可以發現有些數值特別高，根據軌跡記錄與觀測影片對照，兩圖中的這些高數值部分應該是纖毛蟲的逃跑事件，纖毛蟲為逃離掠食者進行高速游動(Titelman, 2001; Yen, 2000)，所以動能值非常高。



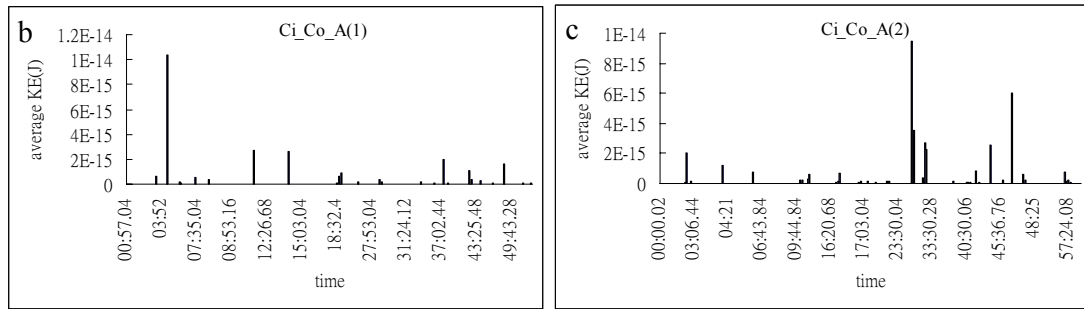
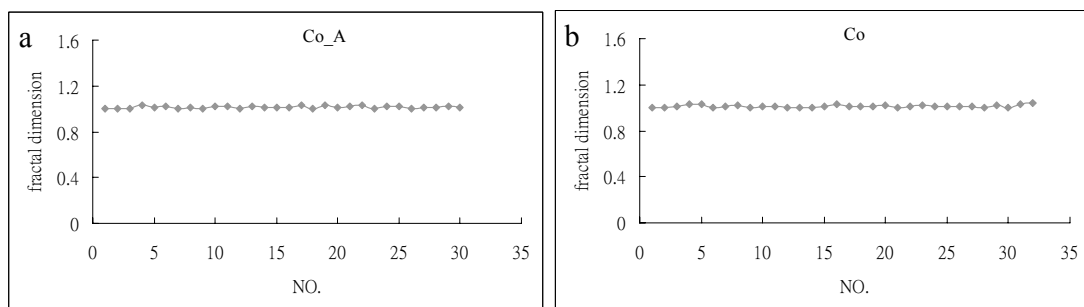


圖 4.13 纖毛蟲的平均動能長條圖，a 為 Ci\_A、 b 為 Ci\_Co\_A(1)，c 為 Ci\_Co\_A(2)

比較橈足類與纖毛蟲的動能測量，橈足類在有獵物的環境，其動能高於沒有獵物時的百倍( $6.64561E-11/6.64449E-13=100.016845$ )，顯示橈足類在捕捉獵物方面願意花費大量能量也要進行捕食，而纖毛蟲在有掠食者/無掠食者環境的動能差異為 46 倍( $1.26279E-16/2.71336E-18=46.53965924$ )，雖稍遜於橈足類的動能差異，但也相當可觀，對纖毛蟲而言不被捕食，維持生命的存續是值得花費大量能量，橈足類覓食與纖毛蟲不被捕食都消耗其大量能量就是為提高本身存活的機率 (Vlymen, 1970)。

● 碎形維度-橈足類為觀察主體

碎形維度測量浮游動物軌跡比 NGDR 更能明確區分少量的差異 (Seuront et al., 2004a)，在未受獵物干擾的環境 Co\_A 與 Co 的橈足類碎形維度值，如圖 4.14a 和 b 所示其趨勢相當接近，兩者沒有明顯差別 (Mann-Whitney U-test,  $p>0.01$ )，而掠食者-獵物互動環境中的橈足類碎形維度值與對照組比較具有顯著不同 (Mann-Whitney U-test,  $p<0.01$ )，如圖 4.14c 和 d 所示，依據碎形維度所提高的資訊可得知橈足類在沒有纖毛蟲的環境中其游泳軌跡複雜度較低，而在有纖毛蟲的環境中其游泳軌跡複雜度比較高。





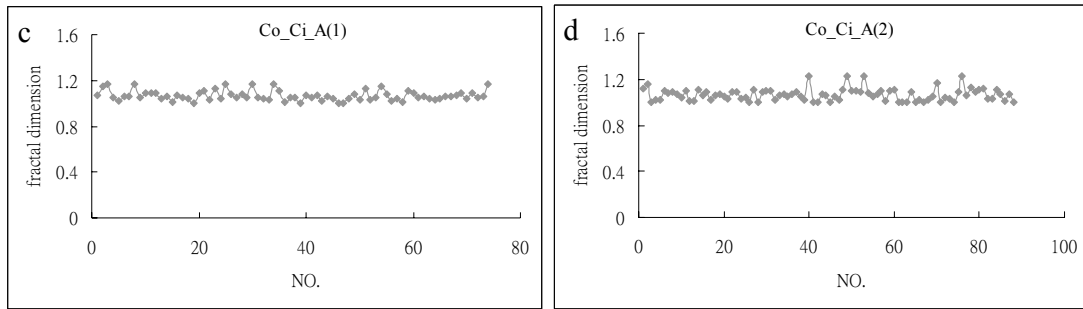


圖 4.14 橈足類的碎形維度散佈圖，a 為 Co\_A、b 為 Co、c 為 Co\_Ci\_A(1)和 d 為 Co\_Ci\_A(2)

● 碎形維度-纖毛蟲為觀察主體

纖毛蟲的碎形維度測量情形與橈足類類似，在有掠食者-獵物互動環境的纖毛蟲碎形維度顯著高於未受掠食者干擾環境的測量值(Mann-Whitney U-test,  $p < 0.05$ )，參考圖 4.15a、b 和 c 及表 4.5，在未受掠食者干擾時纖毛蟲游泳軌跡複雜性低於掠食者-獵物互動環境下的纖毛蟲游泳軌跡。

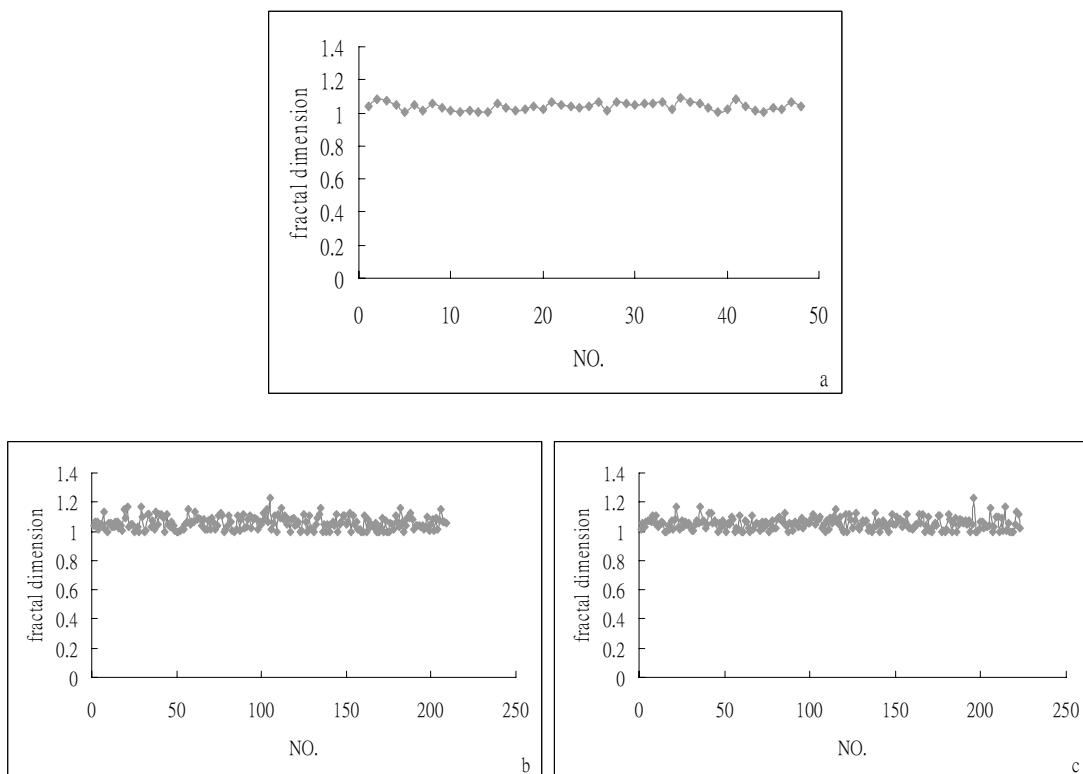


圖 4.15 纖毛蟲的碎形維度散佈圖，a 為 Ci\_A、b 為 Ci\_Co\_A(1)與 c 為 Ci\_Co\_A(2)。

另外比較橈足類與纖毛蟲同樣在未受干擾時的碎形維度，見表 4.4 與表 4.5，

橈足類碎形維度值為 1.01215 與 1.01303 都低於纖毛蟲的 1.039193，顯示纖毛蟲的軌跡在未受干擾時較橈足類複雜。

表 4.4 橈足類於不同環境的碎形維度平均值

代號	碎形維度平均
Co_A	1.01215
Co	1.01303
Co_Ci_A(1)	1.06597
Co_Ci_A(2)	1.06602

表 4.5 纖毛蟲於不同環境的碎形維度平均值

代號	碎形維度平均
Ci_A	1.039193
Ci_Co_A(1)	1.057461
Ci_Co_A(2)	1.054327

## 4.2 資料採礦分析

運動指標的測量對橈足類與纖毛蟲在空間互動型態無法提供良好的資訊，故本研究對橈足類與纖毛蟲互動軌跡進行編碼，並運用關聯法則與決策樹技術對這些互動編碼資料進行分析，所得到的成果如下所述。

### 4.2.1 關聯法則分析

運用 Weka 關聯法則的資料需要類別型資料，將原本橈足類與纖毛蟲互動編碼中的連續數值資料(距離和 NGDR)經過分群技術分成四個類別，其數值範圍如表 4.6 所示：

表 4.6 距離和 NGDR 的類別範圍

類別代號	A	B	C	D
距離(dist)範圍(mm)	>2.628	1.978~2.628	1.2596~1.978	<1.2596
NGDR 範圍	>0.68	0.45~0.68	0.24~0.45	<0.24

藉關聯法則找出在橈足類與纖毛蟲互動編碼資料中的法則，本研究希望找出的法則的信賴度越高越好，故設定信賴度為 70%，根據此設定 Weka 找出以下信

賴度 70% 以上的法則，如表 4.7 所示，在表中的「事件數」欄位中都有兩個數字以「-」連接，「-」左方的數字表法則的前項項目集的支持個數(support count)，「-」右方的數字表前項項目集與後項項目集聯集的支持個數。以表 4.7 的一些法則進行說明，如法則 1 「action=meet ==> dist=D」，表互動狀態為 meet 時，橈足類與纖毛蟲間的距離範圍會小於 1.2596(mm)；法則 3 「co=x ci=x+3 dist=D ==> action=approach」，表橈足類在第 x 區、纖毛蟲在橈足類下方的第 x+3 區(例如：橈足類在第 5 區，纖毛蟲在第 8 區(5+3=8))以及兩者互動狀態為 approach 時，橈足類與纖毛蟲間的距離範圍會小於 1.2596(mm)；法則 4 「co=x ci=x ==> action=meet」，是指橈足類在第 x 區，纖毛蟲也在第 x 區時，兩者互動狀態會是 meet。

表 4.7 關聯法則

編號	法則	事件數	信賴度
1	action=meet ==> dist=D	142-142	100%
2	action=miss ==> dist=D	60-56	93%
3	co=x ci=x+3 dist=D ==> action=approach	71-63	89%
4	co=x ci=x ==> action=meet	127-112	88%
5	ci=2 action=depart ==> NGDR=A	25-20	80%
6	co=9 ci=1 action=constant ==> dist=A	28-21	75%
7	co=4 action=approach dist=D ==> NGDR=A	39-29	74%
8	co=9 ci=1 action=depart ==> dist=A	31-23	74%
9	co=5 action=approach NGDR=A ==> dist=D	23-17	74%
10	dist=B NGDR=C ==> action=constant	22-16	73%
11	co=4 action=depart ==> NGDR=A	35-25	71%
12	co=9 ci=1 dist=A ==> NGDR=B	21-15	71%
13	co=8 ci=1 ==> action=depart	24-17	71%
14	co=2 ci=8 action=approach ==> dist=C	24-17	71%

將表 4.7 的法則整理後，得到以下結論：

- ◆ 橈足類與纖毛蟲之間的距離 1.2596(mm) 以下時，兩者的互動狀態會是 meet 或 miss，通常兩者位於相同區域時的距離會少於 1.2596 (mm)，所以當兩者在同一區，常會發生 meet 或 miss 的互動，而在同一區兩者互動會是 meet

或 miss 是因為此兩種狀態具有次序關係，根據本研究定義 miss 的發生必要有 meet 事件先出現，所以在同一區橈足類與纖毛蟲才會出現有 meet 或 miss 的情形，且整體 miss : meet=37.3%(此數值並非由關聯法則產生，而是經統計得到)(法則 1、2 和 4)。

- ◆ 橈足類位於上方區域，纖毛蟲位於下方區域，橈足類由上至下進行垂直方向的游泳下沉行為是明顯的特徵，橈足類可藉此行為靠近下方的纖毛蟲(法則 3 和 14)。
- ◆ 橈足類位於下方區域，纖毛蟲位於上方區域，橈足類並不會進行由下而上的游泳行為，通常兩者的互動狀態會是 depart 或 constant(法則 6、8 和 13)。
- ◆ 橈足類與纖毛蟲之間的距離在 1.978~2.628 (mm)範圍內，橈足類游泳軌跡呈現較扭曲(NGDR 介於 0.24~0.45)時，兩者的互動狀態會是 constant(法則 10)。
- ◆ 橈足類與纖毛蟲互動狀態是 approach 或 depart 時，橈足類游泳行為可能會比較接近直線運動(NGDR 大於 0.68)，軌跡較為筆直(法則 5 和 7)。

經關聯法則分析後，雖找出一些橈足類與纖毛蟲互動特徵，但對於本研究互動編碼中的空間區域，關聯法則並沒有充分揭露關於這方面的資訊，所以又使用決策樹進行分析，以了解空間區域對橈足類與纖毛蟲的行為影響。

#### 4.2.2 決策樹分析

對於橈足類與纖毛蟲在空間行為上的分析，決策樹顯示出比關連法則更佳的分析結果，如附錄二所示，將決策樹法則整理之後，獲得以下結論：

- ◆ 橈足類與纖毛蟲之間的距離在 0.617007 (mm)以下時，兩者的互動狀態會是 meet，距離數值之所以比關連法則的 1.2596(mm)來的小，是因為關聯法則是使用類別資料在數值精細度比較粗略(rule 1)。
- ◆ 對真實的橈足類偵測距離很難經由觀察中估計(Broglio et al., 2001)，本研究藉互動編碼與資料採礦分析間接得到橈足類與纖毛蟲之間的距離在 0.96058(mm)以下時，兩者的互動狀態會是 approach，此距離可視為使用資

料採礦方式所獲得關於橈足類的偵測距離(detection distances)數值(rule 2)。

- ◆ 橈足類位於上方區域，纖毛蟲位於下方區域，橈足類由上至下進行垂直方向的游泳下沉行為，在決策樹分析中也是一項明顯的特徵(rule 20、32、42、43 和 48)。
- ◆ 橈足類位於下方區域，纖毛蟲位於上方區域，橈足類通常不會進行由下而上的游泳行為，兩者的互動狀態常是 depart 或 constant(rule 5、27 和 37)。
- ◆ 橈足類與纖毛蟲所在區位於相同高度時，橈足類進行水平方向由左至右或由右至左的游泳行為，通常會讓兩者的互動狀態為 approach，這項特徵在關聯法則中沒有被揭露(rule 3、23、34、52 和 53)。
- ◆ 橈足類與纖毛蟲互動狀態是 approach 或 depart，橈足類的 NGDR 通常是處在中高數值位置，顯示橈足類可能進行彈道型游泳移動(rule 6、23、27、42、43、45 和 47)。
- ◆ 橈足類 NGDR 隨纖毛蟲位置不同也呈現不同特徵，若橈足類與纖毛蟲是處在相同高度區域，此時橈足類 NGDR 會較大，顯示其游泳軌跡較筆直，若橈足類與纖毛蟲是位於不同高度，橈足類 NGDR 會較小，而且隨橈足類與纖毛蟲位置高度相差越多，其橈足類 NGDR 會越低(rule 9、10、13、14、22、23、26、27、41、42 和 43)。

關聯法則與決策樹關於距離對橈足類的行為反應經過整理後，繪製成圖 4.16，顯示橈足類隨不同距離產生的行為反應的機率，本研究以同心圓表示可發現隨距離增加其偵測能力的弱化情形，例如橈足類與纖毛蟲之間距離在 0.6169(mm)以下時，發生 meet 的機率為 77%；若兩者之間的距離拉長到 1.569(mm)時，互動狀態就非 meet 而是 approach，其機率為 63%；若兩者之間的距離再拉長到 2.2602(mm)，此時的 approach 機率就只剩 44%。

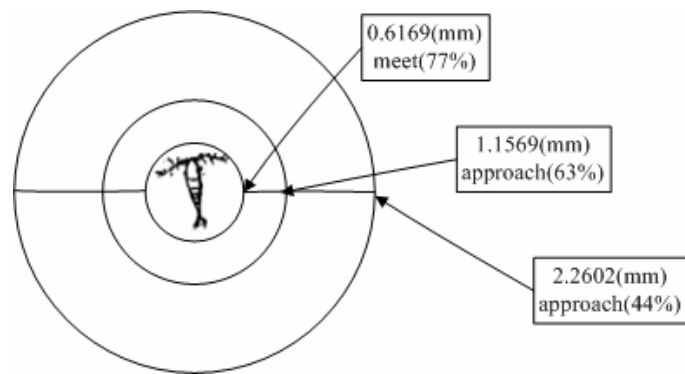


圖 4.16 橈足類行為與距離示意

有關橈足類與纖毛蟲空間區域與互動狀態的分析，本研究除以上進行的資料採礦外，也將互動狀態事件數目與網格空間進行結合，繪製成泡泡圖(Bubbles Diagram)，以圖形方式呈現橈足類與纖毛蟲空間區域與互動行為的關係，請參考附錄一。

#### 4.3 成果討論

本研究對橈足類與纖毛蟲軌跡數值資料進行量化且客觀的分析，避免因人為因素在觀察橈足類與纖毛蟲互動時產生錯誤理解或錯誤印象，表 4.8 整理本研究成果並與文獻結論作對照比較。

表 4.8 成果對照，以量化且客觀的分析橈足類與纖毛蟲的互動行為所得的成果，與文獻論點進行對照，對於相似的論點在表中會合併比較，本研究分析的橈足類種類是 *A. tonsa*

作者	文獻論點	本研究成果	比較
Jonsson & Tiselius (1990)	橈足類開始朝向獵物移動的距離，或橈足類用口器創造攝食流對付獵物時的距離作為橈足類的偵測距離。	對橈足類與纖毛蟲互動編碼資料進行資料採礦分析，得到橈足類在 0.96058 (mm)內會接近纖毛蟲，此數值可當作運用資料採礦方式得到的橈足類偵測距離。	類似，編碼中”偵測距離”的概念類似 Jonsson & Tiselius(1990)中的朝向獵物移動的距離。
Broglio et al.(2001)	藉估計橈足類 <i>A.clausii</i> 攻擊獵物的距離，用其當作偵測距離的最小估計。		
Titelman & Kiørboe (2003)	橈足類偵測獵物的距離，是假設獵物速度足以觸發橈足類的攻擊，使用速度和獵物半徑等等參數計算橈足		

	類偵測距離。		
van Duren & Videler (1995)	根據最適捕食理論，橈足類 <i>Tlongicornis</i> 在低食物濃度會採取能量成本較不昂貴的捕食策略，而在較高食物濃度時會採取較昂貴但值得的搜尋策略。	根據動能指標分析，橈足類在有纖毛蟲存在之環境的游泳動能，是沒有纖毛蟲存在環境的游泳動能百倍以上，依最適捕食理論觀點推測，橈足類捕食纖毛蟲所獲得的能量產率應遠遠大於藻類，所以橈足類願意消耗大量能量進行捕食纖毛蟲的行為。	相同
Yen (2000)	橈足類下沉行為是為保存能量。	橈足類下沉行為經軌跡分析，得到此行為所產生的動能遠低於其他類型的游泳行為。	相同
Titelman (2001)	橈足類進行下沉行為，可減少水動力訊(hydrodynamic signal)，降低被掠食者捕食的機率。	橈足類下沉行為經軌跡分析與互動編碼分析，得到橈足類可利用此行為接近下方的纖毛蟲，推測可能藉由下沉行為減少水動力訊號，降低被纖毛蟲發現的機率，而提高捕食機率。	根據文獻論點，並配合研究成果對橈足類行為進行推論。
Doall et al.(2002)	橈足類 E.rimanan 搜尋獵物的游泳風格，是先盤旋(hovering)後再下沉，兩種移動都是以低速進行。		
Titelman (2001)	行為差異可能會反應在最佳化攝食與躲避天敵上，這兩種行為對物種都很重要，但若躲避天敵失敗的話，很明顯不利於物種的壽命。	以動能指標分析，纖毛蟲在橈足類存在環境的動能，與沒有橈足類存在環境的動能差異達46倍，配合 NGDR 指標及軌跡分析，纖毛蟲的高速移動事件在有掠食者-獵物互動下大幅上升，而根據擴散係數分析，纖毛蟲在有無橈足類存在環境中的擴散係數無明顯差異，顯示纖毛蟲的躲避天敵策略可能不是以擴散行為降低遇到掠食者的機率。	根據文獻論點，並配合研究成果對纖毛蟲行為進行推論。
Jakobsen et al.(2005)	獵物要減少遇到掠食者的機率，可藉由降低游速，以減低水動力訊號，但此方式要付出搜尋資源能力下降的代價；另一種方式是發展遠距偵測能力執行逃跑行為。		
Visser & Kiørboe	有機體的擴散行為對掠食者-獵物互動，會產生低相遇		

(2006)	率。		
Jonsson & Tiselius (1990)	藻類 <i>Pyramimonas sp.</i> 濃度並不影響橈足類 <i>A. tonsa</i> 對不同纖毛蟲濃度的捕食反應。	經指標分析及統計檢定，本研究也得到藻類對橈足類行為沒有顯著影響，纖毛蟲才是影響橈足類游泳行為的主因之結論。	相同
Visser & Kiørboe (2006)	食物的可得性對轉彎率的減少可能是強烈的驅動因子。	根據轉彎程度指標的分析，橈足類在有纖毛蟲存在環境下，其轉彎程度較低，而在沒有纖毛蟲存在環境下的轉彎程度較高。	相同
		根據轉彎程度指標的分析，在都有食物(藻類)環境中，掠食者存在與否對纖毛蟲的轉彎行為有強烈影響。	有差異在影響轉彎的因子。
	有機體感知其獵物的距離，與感知其獵食者之距離應該相當不同，推論橈足類最佳游泳策略是對獵物採取彈道型移動，對掠食者採取擴散型移動。	根據NGDR及動能指標分析，橈足類在纖毛蟲存在環境下，其彈道型移動的確是大幅上升，但藉擴散係數分析，在此環境中橈足類的擴散行為也遠比沒有纖毛蟲存在環境的橈足類多，橈足類的擴散行為可能不只是降低與掠食者相遇率的功能，應該還有其他生物的意義。	有差異在擴散行為的詮釋。
Titelman (2001)	橈足類 <i>A. tonsa</i> 的游泳特徵是”跳躍-下沉”(hop-and-sink)。	根據動能指標分析，呈現”跳躍-下沉”式的游泳特徵，在圖 4.10 上峰值的部份，即為橈足類跳躍事件。	相同
Waggett & Buskey (2006)			

最後本研究想要強調小尺度掠食者-獵物互動的重要性，對於浮游動物的行為特徵並非只關注游泳速度的變化，應還要對其游泳軌跡及其空間分佈等更多相關因素或機制進行深入探討。



## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

關於浮游生物這類有機體的研究已超過百年，人類對於牠們生態功能的知識是逐步成長，但仍然有大量可供努力的空間(MZC2, 2001)，本研究著重於浮游動物個體行為的議題探討，運用不同運動型指標分析橈足類與纖毛蟲的游泳軌跡藉此了解其行為反應，尤其關注橈足類與纖毛蟲兩者的互動行為，所以除運動型指標測量之外，又進行橈足類與纖毛蟲互動軌跡編碼化並配合資料採礦技術尋找其中的互動形態。

關於運動指標的測量分析，本研究得到橈足類與纖毛蟲在未受干擾環境及有掠食者-獵物互動環境下的游泳行為特徵，這些游泳行為資料的分析有助於了解橈足類與纖毛蟲於自然界真實的情況，而互動編碼及資料採礦分析，則提供有關橈足類與纖毛蟲空間位置對行為的影響資訊，本研究結論如下：

1. 藉運動型指標的測量分析，本研究獲得橈足類與纖毛蟲的游泳行為特徵，如 NGDR 指標了解不同情形下橈足類與纖毛蟲的游泳軌跡的扭曲程度，橈足類與纖毛蟲在未受干擾環境下軌跡都呈現較扭曲的現象，而在互動環境中扭曲和筆直軌跡特徵均存在；轉彎程度指標得知橈足類與纖毛蟲的轉彎行為情況，橈足類在未受干擾環境與互動環境的轉彎程度變化是由大角度轉換為小角度，纖毛蟲則是由小角度變換為大角度；擴散係數指標衡量橈足類與纖毛蟲的擴散情形，橈足類在未受干擾環境中呈現較多的擴散行為，在互動環境中則擴散行為便少，而纖毛蟲在此兩種環境下，擴散行為沒有明顯變化；動能指標獲得橈足類與纖毛蟲的能量支出情形，橈足類與纖毛蟲為生存都花費巨額能量，在互動/未受干擾環境的動能比，橈足類是 100.01 倍，纖毛蟲為 46.5 倍，顯示橈足類與纖毛蟲為生存都不惜投入大量能量提高生存機率；碎形維度指標計算橈足類與纖毛蟲的游泳路徑複雜性，得知橈足類與纖毛蟲在

互動環境中的游泳軌跡較未受干擾環境中的軌跡複雜，這些運動型指標的分析遠比只關注游泳速度變化的行為特徵(Waggett & Buskey, 2006)，更能了解橈足類與纖毛蟲基本型態與互動形態的真實行為面貌。

2. 有關橈足類與纖毛蟲互動編碼部分，則是對浮游動物這類型的軌跡序列資料，提供另一種思考方式與分析方法，本研究在編碼中放入橈足類與纖毛蟲所在空間區域、距離和橈足類 NGDR 等參數，並藉助資料採礦技術得到橈足類與纖毛蟲的互動狀態與上述參數之間的關係，例如在 1.978~2.268(mm) 範圍內，橈足類軌跡較扭曲(NGDR 在 0.24~0.45)，以及橈足類對纖毛蟲的游泳型態是以從上到下的下沉行為、或是水平方向的移動，由下至上的移動通常不會進行，橈足類偵測距離的成功率與距離的關係，以及其偵測距離 0.96058(mm) 的數值，透過此分析技術不僅可以將一些原本用質化方式觀察到的行為(Titelman, 2001)以量化分析方式呈現，還可分析單純用運動型指標比較難以處理的地方。
3. 本研究所使用的測量浮游動物行為的方法可以應用到其他種類的浮游動物上，運動型指標原本就是由文獻中測量不同浮游動物行為所選取的，所以應用在其他浮游動物上絕對是可行的，而橈足類與纖毛蟲互動編碼，則具有相當高的彈性，可以根據研究者需求在編碼方式上進行變更，不僅可進行類似本研究關於橈足類與纖毛蟲空間上的分析，透過不同編碼方式，其他的行為分析應該也是可應用的，編碼的應用範圍十分廣泛且具有彈性。

## 5.2 建議

對於橈足類與纖毛蟲的游泳行為分析，本研究雖然盡量以客觀量化的方式進行研究，但仍然存有一些較困難處理的問題或是分析不足之處，因此列出幾項建議以供未來研究作為參考：

1. 關於橈足類與纖毛蟲互動編碼，本研究僅根據兩者軌跡的數化資料進行分

析，雖然此作法降低人為誤判的機率，但未能配合觀察橈足類器官(口器、觸鬚或足肢)的細節動作，可能使橈足類與纖毛蟲互動狀態的分類過於單純，以致使橈足類行為的編碼偏重在橈足類移動行為，而不是對其整體行為的描述編碼，關於互動狀態這部份仍有許多改進的地方。

2. 本研究的運動型指標與互動編碼基本上都是屬於軌跡的分析，兩者應該有不少具關聯性或是可互相參照之處，但實際分析時仍將兩者分開探討，未能充分整合兩者及探討其關係，在整合性部分還能再提升以求更好的分析結果。
3. 本研究以軌跡分析作為研究之主題，然而橈足類與纖毛蟲行為上有不少特徵是軌跡分析難以涉及之處，受限於人物力等因素這部份的行為分析比較欠缺，後續研究可著重於此部分，分析軌跡之外的浮游動物行為。
4. 本研究所分析橈足類與纖毛蟲互動情形可以更複雜化，橈足類在海洋食物網中扮演掠食者與獵物兩種角色，可參考圖 1.1，但本研究只針對橈足類的掠食者角色進行探討，如此並不能完整呈現出橈足類在自然界真實的面貌，未來的實驗設計應可加入橈足類的掠食者，分析橈足類作為獵物角色的行為反應，完整描述橈足類於自然界中的行為特徵。

## 參考文獻

- Allen, M., Brown, G.J., and Miles, N.J., (1995). Measurement of boundary fractal dimensions: review of current techniques. *Powder Technology*, 84, pp.1-14.
- Azam, F., Fenchel, T., Field, J.G., Graf, J.S., Meyer-Reil, L.A., and Thingstad, F., (1983). The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar Ecol Prog Ser*, 10, pp.257-263.
- Bagøien, E., and Kiørboe, T., (2005). Blind dating-mate finding in planktonic copepods. III. Hydromechanical communication in *Acartia tonsa*. *Mar Ecol Prog Ser*, 300, pp.129-133.
- Bartumeus, F., Peters, F., Pueyo, S., Marrasé, C., and Catalan, J., (2003). Helical Lévy walk: adjusting searching statistics to resource availability in microzooplankton. *Proc Natl Acad Sci USA*, 100, pp.12771-12775.
- Broglio, E., Johansson, M., and Jonsson, P.R., (2001). Trophic interaction between copepods and ciliates: effects of prey swimming behavior on predation risk. *Mar Ecol Prog Ser*, 220, pp.179-186.
- Buskey, E.J., Mills, L., and Swift, E., (1983). The effects of dinoflagellate bioluminescence on the swimming behavior of a marine copepod. *Limnology and Oceanography*, 28, pp.575-579.
- Buskey, E.J., Lenz, P.H., and Hartline, D.K., (2002). Escape behavior of planktonic copepods in response to hydrodynamic disturbances: high speed video analysis. *Mar Ecol Prog Ser*, 235, pp.135-146.
- Calbet, A., and Saiz, E., (2005). The ciliate-copepod link in marine ecosystems. *Aquat Microb Ecol*, 38, pp.157-167.
- Cao, H., Mamoulis, N., and Cheung, D.W., (2005). Mining frequent spatio-temporal sequential patterns. *Proceedings of the fifth IEEE international conference on data mining (ICDM'05)*, pp. 82-90.
- Clementini, E., Di Felice, P., and Hernández, D., (1997). Qualitative representation of positional information. *Artificial Intelligence*, 95, pp.317-356.
- Cowles, T.J., and Strickler, J.R., (1983). Characterization of feeding activity patterns in the planktonic copepod *Centropages typicus* Kroyer under various food conditions. *Limnology and Oceanography*, 28, pp.106-115.
- Cushing, D.H., (1989). A difference in structure between ecosystems in

- strongly stratified waters and in those that are only weakly stratified. *Journal of Plankton Research*, 11, pp.1-13.
- Doall, M.H., Strickler, J.R., Fields, D.M., and Yen, J., (2002). Mapping the free-swimming attack volume of a planktonic copepod, *Euchaeta rimana*. *Marine Biology*, 140, pp.871-879.
- Dodson, S.I., Ryan, S., Tollrain, R., and Lampert, W., (1997). Individual swimming behavior of *Daphnia*: effects of food, light and container size in four clones. *Journal of Plankton Research*, 19, pp.1537-1552.
- Friedl, M.A., and Brodley, C.E., (1997). Decision Tree Classification of Land Cover from Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 61, pp.399-409.
- Hansson, L.J., and Kiørboe, T., (2006). Prey-specific encounter rates and handling efficiencies as causes of prey selectivity in ambush-feeding hydromedusae. *Limnology and Oceanography*, 51, pp.1849-1858.
- Harnos, A., Horváth, G., Lawrence, A.B., and Vattay, G., (2000). Scaling and intermittency in animal behaviour. *Physica A*, 289, pp.312-320.
- Hernández, D., Clementini, E., and Di Felice, P., (1995). Qualitative distances. In *Proceeding of COSIT'95, LNCS 988*, Semmering, Austria, Springer.
- Jakobsen, H.H., (2001). Escape response of planktonic protists to fluid mechanical signals. *Mar Ecol Prog Ser*, 214, pp.67-78.
- Jakobsen, H.H., Everett, L.M., and Storm, S.L., (2006). Hydromechanical signaling between the ciliate *Mesodinium pulex* and motile protist prey. *Aquat Microb Ecol*, 44, pp.197-206.
- Jakobsen, H.H., Halvorsen, E., Hansen, W.B., and Visser, A.W., (2005). Effects of prey motility and concentration on feeding in *Acartia tonsa* and *Temora longicornis*: the importance of feeding modes. *Journal of Plankton Research*, 27, pp.775-785.
- Jonsson, P.R., and Tiselius, P., (1990). Feeding behaviour, prey detection and capture efficiency of the copepod *Acartia tonsa* feeding on planktonic ciliates. *Mar Ecol Prog Ser*, 60, pp.35-44.
- Kiørboe, T., (2008). Optimal swimming strategies in mate-searching pelagic copepods. *Oecologia*, 155, pp.179-192.
- Kiørboe, T., and Bagøien, E., (2005). Motility patterns and mate encounter rates in

- planktonic copepods. *Limnology and Oceanography*, 50, pp.1999-2007.
- Klafter, J., Shlesinger, M.F., and Zumofen, G., (1996). Beyond Brownian motion. *Physics Today*, 49, pp.33-39.
- Lattner, A.D., Miene, A., Visser, U., and Herzog, O., (2006). Sequential pattern mining for situation and behavior predication in simulated robotic soccer. *RoboCup*, pp.118-129.
- Leising, A.W., and Franks, P.J.S., (2002). Does *Acartia clausi* (Copepoda: Calanoida) use an area-restricted search foraging strategy to find food? *Hydrobiologia*, 480, pp.193-207.
- Marguerit, C., Schertzer, D., Schmitt, F., and Lovejoy, S., (1998). Copepod diffusion within multifractal phytoplankton fields. *Journal of Marine Systems*, 16, pp.69-83.
- MZC1 (Marine Zooplankton Colloquium 1), (1989). Future marine zooplankton research – a perspective. *Mar Ecol Prog Ser*, 55, pp.197-206.
- MZC2 (Marine Zooplankton Colloquium 2), (2001). Future marine zooplankton research – a perspective. *Mar Ecol Prog Ser*, 222, pp.297-308.
- Mazzocchi, M.G., and Paffenhöfer, G.A., (1999). Swimming and feeding behaviour of the planktonic copepod *Clausocalanus furcatus*. *Journal of Plankton Research*, 21, pp.1501-1518.
- Miene, A., Lattner, A.D., Visser, U., and Herzog, O., (2004). Dynamic-preserving qualitative motion description for intelligent vehicles. *Proceedings of the IEEE intelligent vehicles symposium (IV'04)*, pp.642-646.
- Podsiadlo, P., and Stachowiak, G.W., (1998). Evaluation of boundary fractal methods for the characterization of wear particles. *Wear*, 217, pp.24-34.
- Pohnert, G., (2005). Diatom/copepod interactions in plankton: the indirect chemical defense of unicellular algae. *ChemBioChem*, 6, pp.946-959.
- Pyke, G.H., (1984). Optimal foraging theory: a critical review. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 15, pp.523-575.
- Quinlan, J.R., (1993). *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufman, San Mateo, CA.
- Saiz, E., and Kiørboe, T., (1995). Predatory and suspension feeding of the copepod *Acartia tonsa* in turbulent environments. *Mar Ecol Prog Ser*, 122, pp.147-158.

- Schmitt, F.G., and Seuront, L., (2001). Multifractal random walk in copepod behavior. *Physica A*, 301, pp.375-396.
- Schmitt, F.G., Seuront, L., Hwang, J.S., Souissi, S., Tseng, L.C., (2006). Scaling of swimming sequences in copepod behavior: Data analysis and simulation. *Physica A*, 364, pp.287-296.
- Seuront, L., Hwang, J.S., Tseng, L.C., Schmitt, F.G., Souissi, S., and Wong, C.K., (2004a). Individual variability in the swimming behavior of the sub-tropical copepod *Oncaea venusta* (copepoda: Poecilostomatoida). *Mar Ecol Prog Ser*, 283, pp.199-217.
- Seuront, L., Schmitt, F.G., Brewer, M.C., Strickler, J.R., and Souissi, S., (2004b). From random walk to multifractal random walk in zooplankton swimming behavior. *Zoological Studies*, 43(2), pp.498-510.
- Seuront, L., Yamazaki, H., and Souissi, S., (2004c). Hydrodynamic disturbance and zooplankton swimming behavior. *Zoological Studies*, 43, pp.376-387.
- Sherr, E.B, and Sherr, B.F., (2002). Significance of predation by protists in aquatic microbial food webs. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81, pp.293-308.
- Stoecker, D.K., and Capuzzo, J.M., (1990). Predation on Protozoa: its importance to zooplankton. *Journal of Plankton Research*, 12, pp.891-908.
- Strom, S.L., and Buskey, E.J., (1993). Feeding, growth, and behavior of the thecate heterotrophic dinoflagellate *Oblea rotunda*. *Limnology and Oceanography*, 38, pp.965-977.
- Suchman, C.L., (2000). Escape behavior of *Acartia hudsonica* copepods during interactions with scyphomedusae. *Journal of Plankton Research*, 22, pp.2307-2323.
- Tan, P.N., Steinbach, M., and Kumar, V., (2005). Introduction to data mining. Pearson Addison-Wesley, Boston, MA, USA.
- Titelman, J., (2001). Swimming and escape behavior of copepod nauplii: implications for predator-prey interactions among copepods. *Mar Ecol Prog Ser*, 213, pp.203-213.
- Titelman, J., and Kjørboe, T., (2003). Predator avoidance by nauplii. *Mar Ecol Prog Ser*, 247, pp.137-149.
- Uttieri, M., Nihongi, A., Mazzocchi, M.G., Strickler, J.R., and Zambianchi, E.,(2007). Pre-copulatory swimming behaviour of *Leptodiaptomus ashlandi* (Copepoda:

- Calanoida): a fractal approach. *Journal of Plankton Research*, 29, pp.i17-i26.
- van Duren, L.A., and Videler, J.J., (1995). Swimming behaviour of developmental stages of the calanoid copepod *Temora longicornis* at different food concentrations. *Mar Ecol Prog Ser*, 126, pp.153-161.
- van Duren, L.A., and Videler, J.J., (1996). The trade-off between feeding, mate seeking and predator avoidance in copepod: behavioural responses to chemical cues. *Journal of Plankton Research*, 18, pp.805-818.
- Villanueva, R., Nozais, C., and Boletzky, S.V., (1996). Swimming behaviour and food searching in planktonic *Octopus vulgaris* Cuvier from hatching to settlement. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 208, pp.169-184.
- Vlymen, W.J., (1970). Energy expenditure of swimming copepods. *Limnology and Oceanography*, 15, pp.348-356.
- Visser, A.W., and Kiørboe, T., (2006). Plankton motility patterns and encounter rates. *Oecologia*, 148, pp.538-546.
- Visser, A.W., and Thygesen, U.H., (2003). Random motility of plankton: diffusive and aggregative contribution. *Journal of Plankton Research*, 25, pp.1156-1168.
- Viswanathan, G.M., Buldyrev, S.V., Havlin, S., da Luz, M.G.E., Raposo, E.P., and Stanley, H.E., (1999). Optimizing the success of random searches. *Nature*, 401, pp.911–914.
- Waggett, R.J., and Buskey, E.J., (2006). Copepod sensitivity to flow fields: detection by copepod of predatory ctenophores. *Mar Ecol Prog Ser*, 323, pp.205-211.
- Waggett, R.J., and Buskey, E.J., (2007a). Copepod escape behavior in non-turbulent and turbulent hydrodynamic regimes. *Mar Ecol Prog Ser*, 334, pp.193-198.
- Waggett, R.J., and Buskey, E.J., (2007b). Calanoid copepod escape behavior in response to a visual predator. *Mar Biol*, 150, pp.599-607.
- Weissburg, M.J., Doall, M.H., and Yen, J., (1998). Following the invisible trail: kinematic analysis of mate-tracking in the copepod *Temora longicornis*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Biological Sciences*, 353, pp.701-712.
- Witten, I.H., and Frank, E., (2005). *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques*. 2<sup>nd</sup> Edition, Morgan Kaufmann, San Francisco.



- Xia, J., Ciesielski, V., and Arrowsmith, C., (2005). Data mining of tourists' spatio-temporal movement patterns: A case study on Phillip Island. In Yichun Xie and Daniel Brown, editors, Proceedings of the Eighth d International Conference on GeoComputation, pp. 1-15.
- Yen, J., (2000). Life in transition: balancing inertial and viscous forces by planktonic copepods. *Biological Bulletin*, 198, pp.213-224.
- Yen, J., Rasberry, K.D., and Webster, D.R., (2008). Quantifying copepod kinematics in a laboratory turbulence apparatus. *Journal of Marine Systems*, 69, pp.283-294.
- 周宏(2004)，統計學觀念與方法，鼎茂圖書，台北。
- 賴柏全(2005)，應用資料探勘技術於垃圾焚化爐作業之知識擷取，國立中山大學海洋環境及工程研究所碩士論文。
- 鄒明城、孫志鴻(2004)，資料探勘技術在集集大地震引起山崩之研究，地理學報第 36 期，第 117-131 頁。
- 顏彰慶(2007)，利用空間分析研究纖毛蟲在不同餵食條件下的行為特徵，國立中山大學海洋環境及工程研究所碩士論文。

附錄一

以下是有關橈足類與纖毛蟲互動狀態的泡泡圖(Bubbles Diagram)整理，灰色區是纖毛蟲所在區，泡泡的大小表示各種互動狀態事件在不同網格中的多寡。

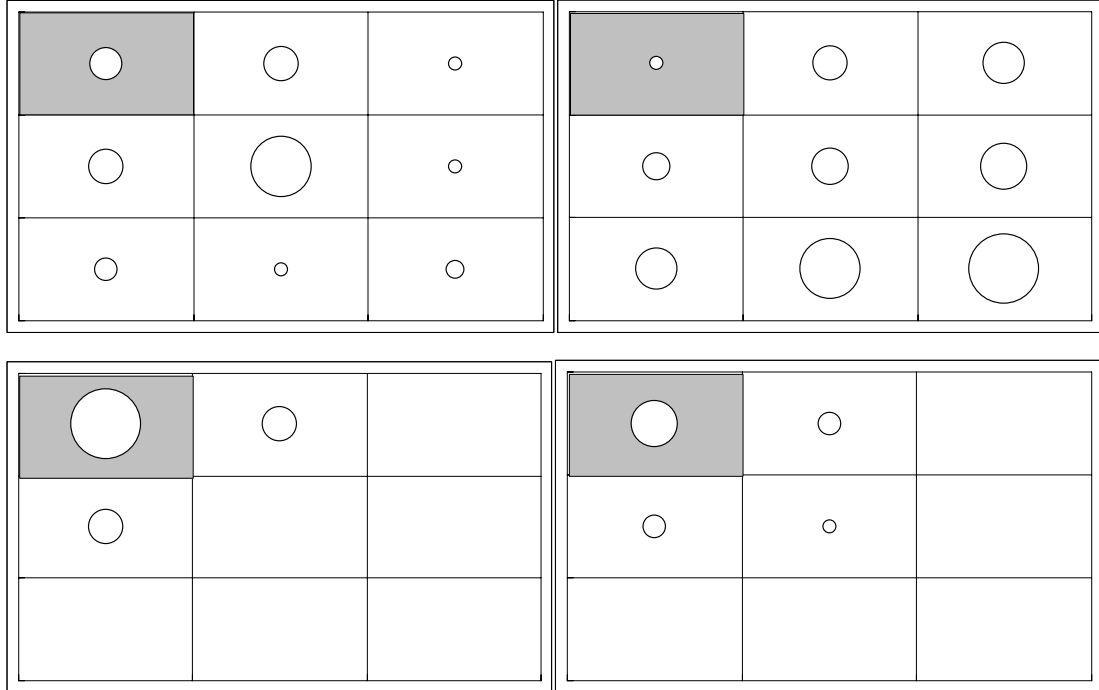


圖 a 為接近狀態，b 為離開狀態，c 為會面狀態，d 為錯失狀態。

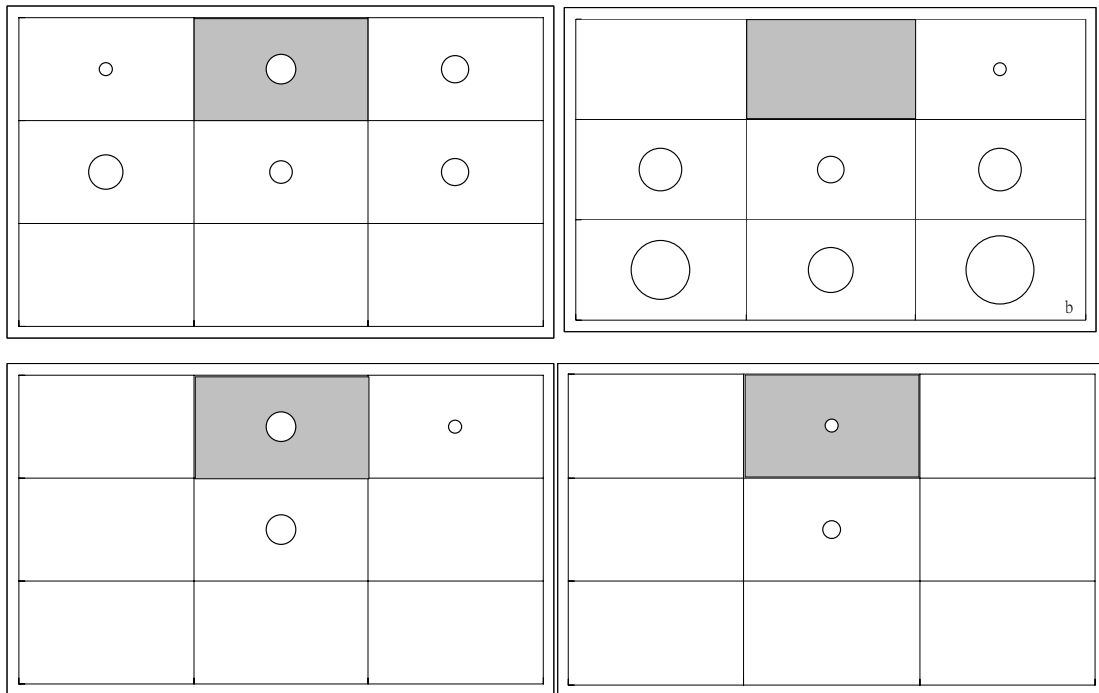


圖 a 為接近狀態，b 為離開狀態，c 為會面狀態，d 為錯失狀態。

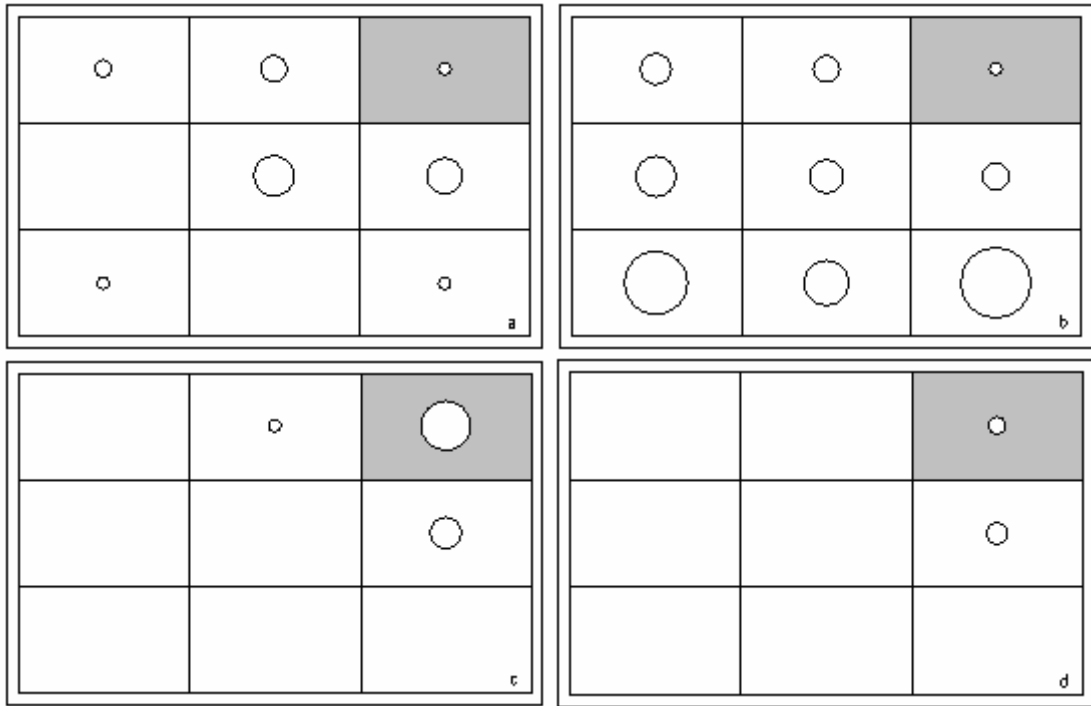


圖 a 為接近狀態，b 為離開狀態，c 為會面狀態，d 為錯失狀態。

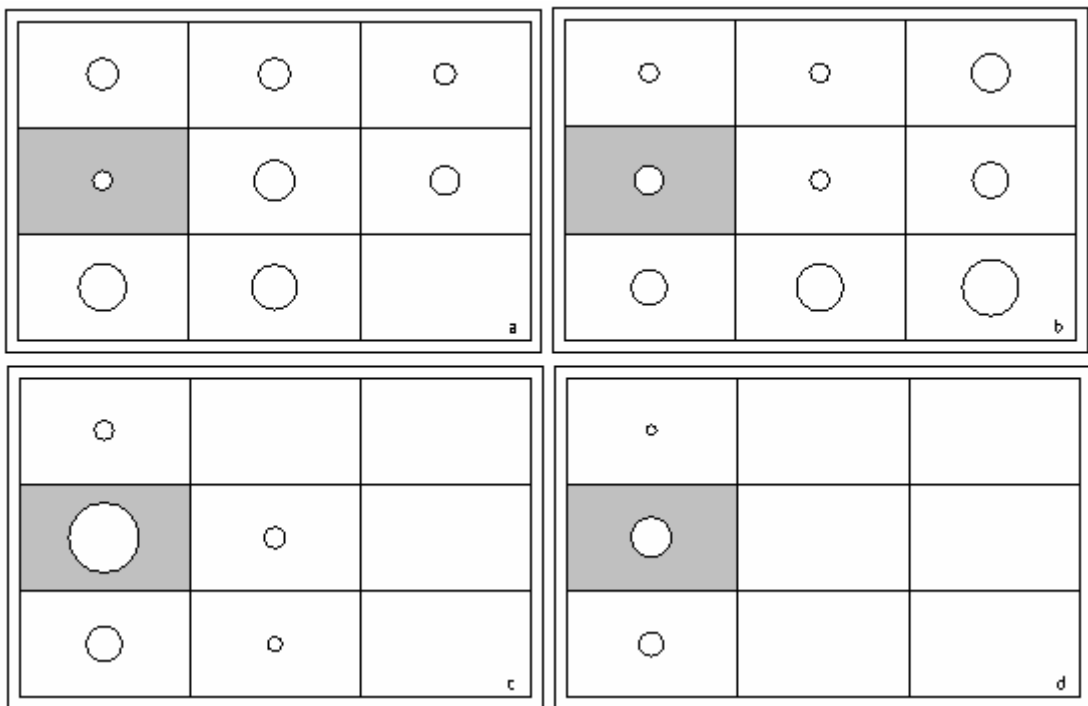


圖 a 為接近狀態，b 為離開狀態，c 為會面狀態，d 為錯失狀態。

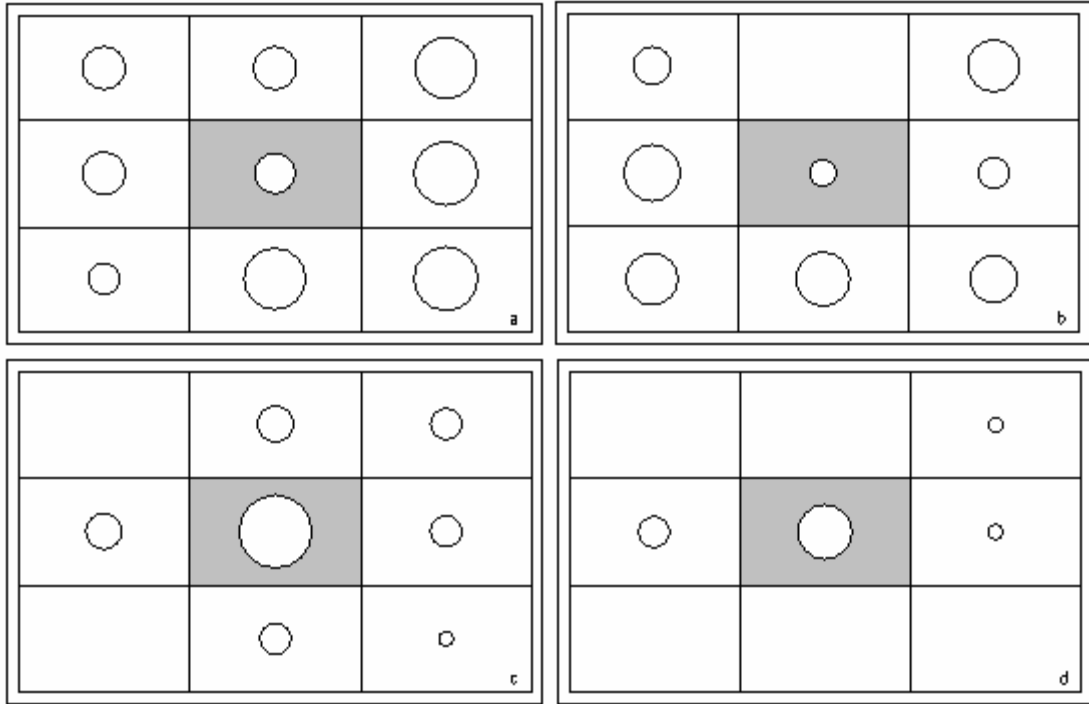


圖 a 為接近狀態，b 為離開狀態，c 為會面狀態，d 為錯失狀態。

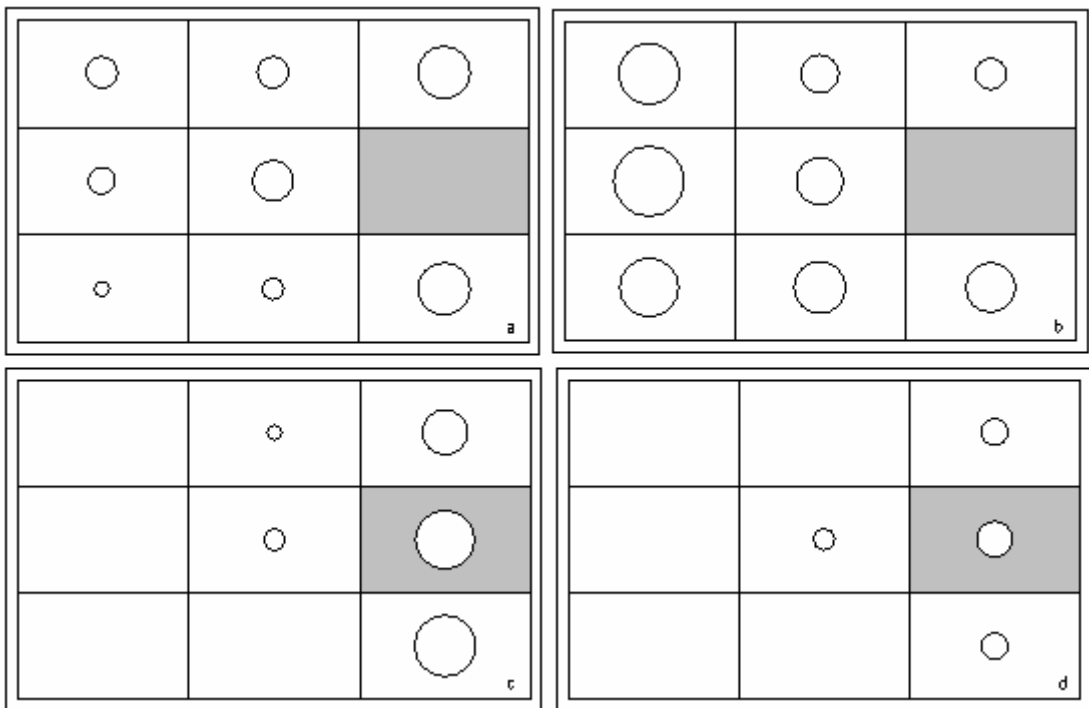


圖 a 為接近狀態，b 為離開狀態，c 為會面狀態，d 為錯失狀態。

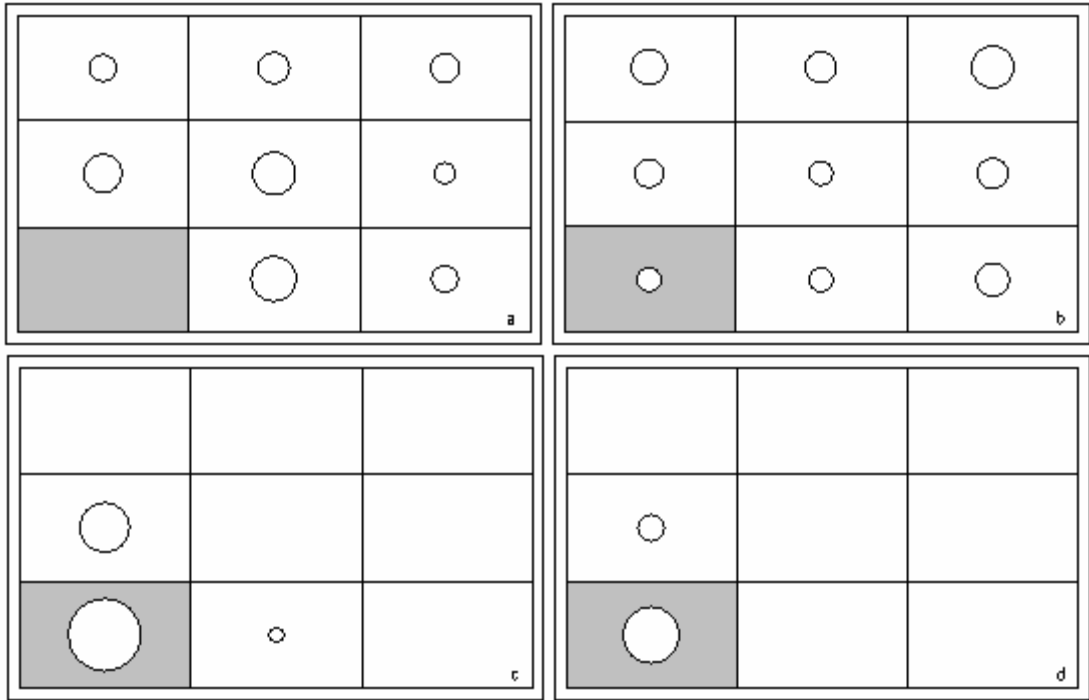


圖 a 為接近狀態，b 為離開狀態，c 為會面狀態，d 為錯失狀態。

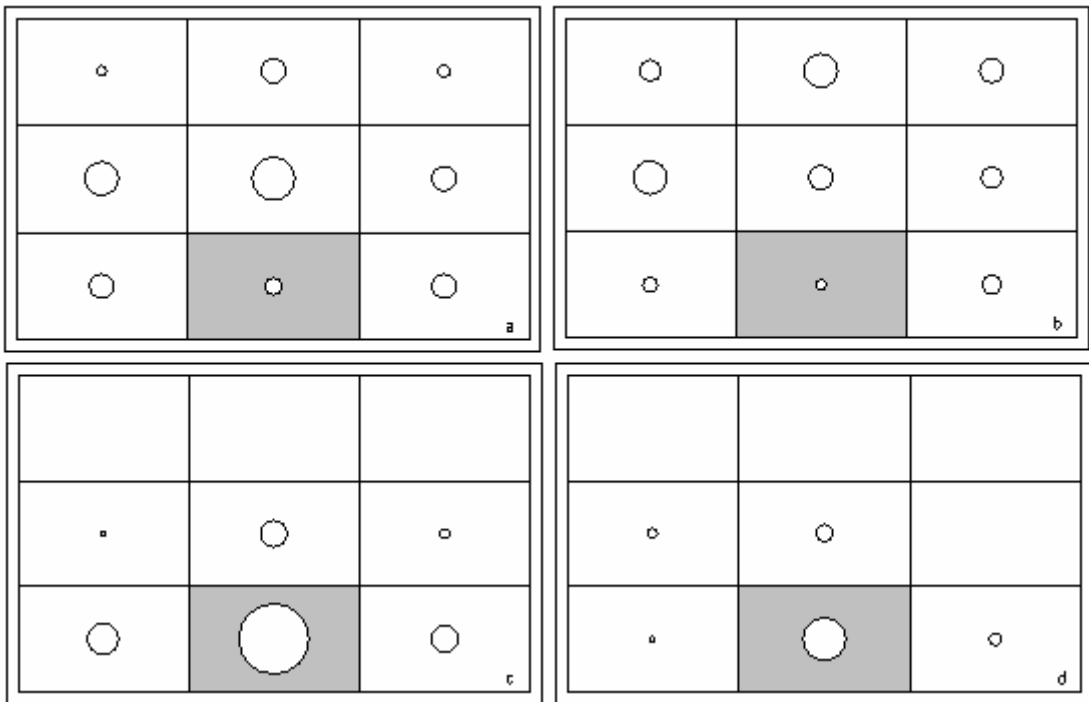


圖 a 為接近狀態，b 為離開狀態，c 為會面狀態，d 為錯失狀態。

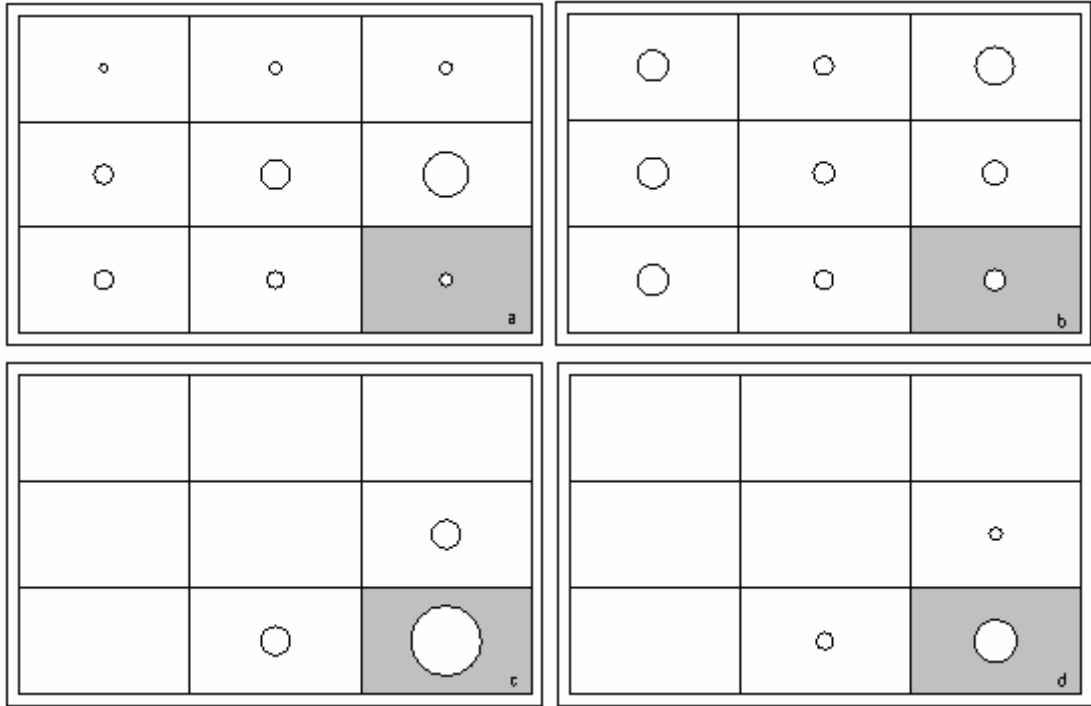
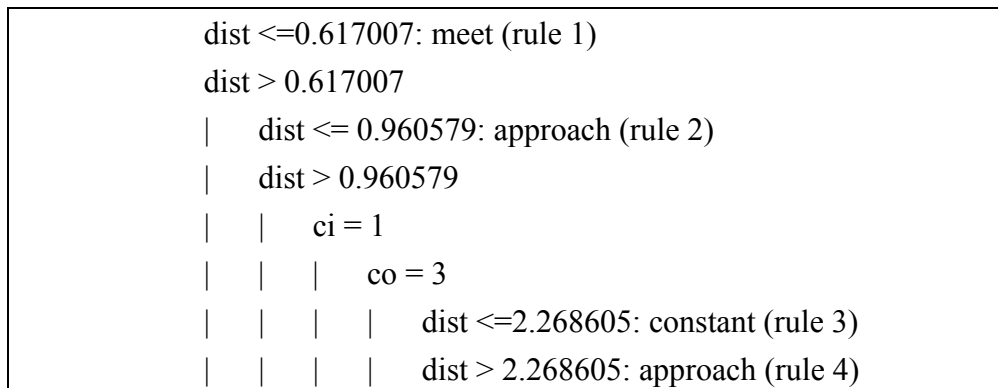


圖 a 為接近狀態，b 為離開狀態，c 為會面狀態，d 為錯失狀態。

## 附錄二

### 互動編碼的決策樹



```

| | | co = 4: depart(rule 5)
| | | co = 5
| | | | dist <= 2.137682
| | | | | dist <=1.351715: constant (rule 6)
| | | | | dist >1.351715: depart (rule 7)
| | | | | dist >2.137682: constant (rule 8)
| | | co = 6
| | | | NGDR <=0.858788: depart (rule 9)
| | | | NGDR >0.858788: constant (rule 10)
| | | co = 8: depart (rule 11)
| | | co = 9
| | | | dist <=2.396969: approach (rule 12)
| | | | dist > 2.396969
| | | | | NGDR <= 0.267916: constant (rule 13)
| | | | | NGDR > 0.267916: depart (rule 14)
| | | ci = 2
| | | | NGDR <= 0.640166: constant (rule 15)
| | | | NGDR > 0.640166: depart (rule 16)
| | | ci = 3: depart (rule 17)
| | | ci = 4: constant (rule 18)
| | | ci = 5
| | | | co = 1: approach (rule 19)
| | | | co = 2: approach (rule 20)
| | | | co = 3: approach (rule 21)
| | | | co = 4
| | | | | NGDR <= 0.766424: constant (rule 22)
| | | | | NGDR > 0.766424: approach (rule 23)
| | | | co = 6: constant (rule 24)
| | | | co = 7: constant (rule 25)
| | | | co = 8
| | | | | dist <=1.286906
| | | | | | NGDR <= 0.586265: constant (rule 26)
| | | | | | NGDR > 0.586265: depart (rule 27)
| | | | | | dist >1.286906: depart (rule 28)
| | | | co = 9: constant (rule 29)
| | | ci = 6
| | | | co = 1: depart (rule 30)

```

			co = 2: approach (rule 31)
			co = 3: approach (rule 32)
			co = 4: constant (rule 33)
			co = 5: approach (rule 34)
			co = 7: constant (rule 35)
			co = 8: constant (rule 36)
			co = 9: depart (rule 37)
			ci = 7: constant (rule 38)
			ci = 8
			co = 1
			dist <=2.115687: approach (rule 39)
			dist >2.115687: depart (rule 40)
			co = 2
			NGDR <= 0.696676
			NGDR <= 0.565719: constant (rule 41)
			NGDR > 0.565719: approach (rule 42)
			NGDR > 0.696676: approach (rule 43)
			co = 3: approach (rule 44)
			co = 4
			dist <= 1.37295
			dist <=1.251428: approach (rule 45)
			dist > 1.251428: constant (rule 46)
			dist >1.37295: depart (rule 47)
			co = 5
			dist <=1.256092
			dist <=1.15542: approach (rule 48)
			dist > 1.15542: constant (rule 49)
			dist >1.256092: depart (rule 50)
			co = 6: approach (rule 51)
			co = 7: approach (rule 52)
			co = 9
			dist <=1.542123: approach (rule 53)
			dist >1.542123: constant (rule 54)
			ci = 9
			dist <=2.110675: approach (rule 55)
			dist > 2.110675: constant (rule 56)