

2020 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 050003
參展科別 動物學
作品名稱 大姬蛛不規則網之拓撲探究
得獎獎項 大會獎：三等獎

就讀學校 基隆市立武崙國民中學
指導教師 葉玉君
作者姓名 潘冠竹

關鍵詞 大姬蛛(*Parasteatoda tepidariorum*)、
三維(3D)立體不規則結構網、
拓撲學(topology)

作者簡介



我是潘冠竹，就讀基隆市武崙國中九年級。在開始科學研究前，我對於科學研究其實沒有興趣。因為當時就讀數理資優班姊姊的一句話：「老弟，科展很有趣，你要不要研究看看？」就這樣，我踏上了科學研究的不歸路。一路走來，遇到了許多挫折，包括實驗失敗或成績退步等等。但愈是如此，愈能激發我的求知慾，而不斷的鑽研未知，更是支持我研究的動力。科學研究，就是我的最愛。

摘要

蜘蛛網在生態學上最成功的在於出色的力學性能、強度、韌性、彈性和堅固性。蜘蛛網的結構從序列設計到蛛網架構都是屬於分層結構。因應不同環境，蜘蛛因環境變化調整蜘蛛網架構。利用GeoGebra軟體分析大姬蛛三維(3D)立體不規則網及拓撲學結構，並以數學幾何方式繪製出蛛網立體架構。

蛛網架構分為：主網、立體次級架構、牽引絲及支架。結網的過程為：牽引絲→主網→次級架構→支架。依照環境不同，蛛網類型區分為三角體、輻射型及吊帶型。蛛網的穩固性：輻射型(n=11) > 三角體型(n=9) > 吊帶型(n=8)。內部的主網分成 12 種拓撲學形狀，其中以稜椎體(29%)比例為最高。依網高指數及支架的有無，蛛網的結網方式：包覆式、紮營式以及倚靠式結法。網的功能依照蛛網上的卵囊有無做為區分，有卵囊蛛網為保護功能，無則為獵食功能。設計的三種環境實驗箱，都結出相對應的蛛網類型。

Abstract

The most ecologically successful spider web is due to the extraordinary mechanics of the spider web, with its strength, tenacity, elasticity and the quality of being strong. Spider web from its hierarchical structures from sequence design to web building. To survive in different environments, spiders can optimize their web architecture to adapt the environment. In this study, we analyze structural topology and the three-dimensional irregular web of spiders (*Parasteatoda tepidariorum*) by using GeoGebra in mathematical geometry.

The web of spiders (*Parasteatoda tepidariorum*) is the three-dimensional irregular web. Spider web architecture includes moorings, webs, secondary frames and gumfoots. The spiders weaving the process of the three-dimensional irregular web is mooring → web → secondary frame → gumfoot. Adapting with environments, the shape of the 3D irregular web can be divided into three types which are triangle type (n=9), radiation type (n=11) and suspender type (n=8). The stability of the spider web is radiation type > triangle type > suspender type. The web is divided into 12 topological shapes. A high percentage of the shapes of a web is pyramid (29%). According to web ratio index and gumfoots, spiders weaving web have three modes that are wrapped mode, camping mode and relying mode. The function of the spider web is based on the presence or absence of oocysts on the spider web. The spider web with oocysts is a protective function web, and the other is a predatory function web. Three kinds of experimental chambers were designed, and the corresponding spider types were produced in each experimental box. The results showed spiders would weave the different spider web architecture in different environments.

壹、前言

一、研究動機

調查校園蜘蛛分布的過程中，觀察到學校活動中心主要的蜘蛛種類為大姬蛛。與其他地區最大的差別在於，此處是一個陰暗的環境，而結網的大姬蛛皆為育幼的雌性蜘蛛，如圖 1。

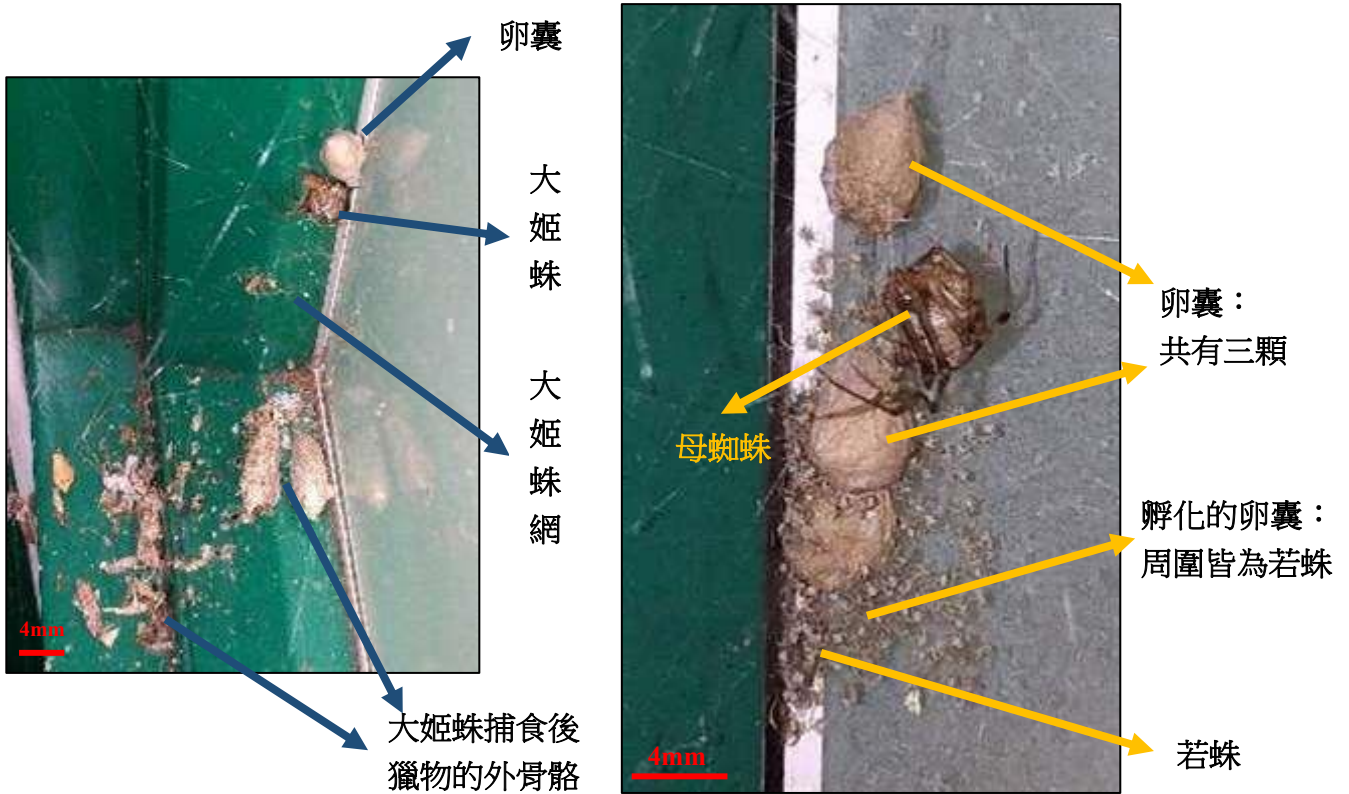


圖 1、學校活動中心雌性大姬蛛與卵囊相對位置

研究期間紀錄了母蛛與卵囊的座標，以 11 月 5~7 日為例子，從圖中的座標位置可以發現，母蛛都位於自己的卵囊周圍，如圖 2 所示。黃色的圈為母子關係，藍色為卵囊，黑色為母蛛。

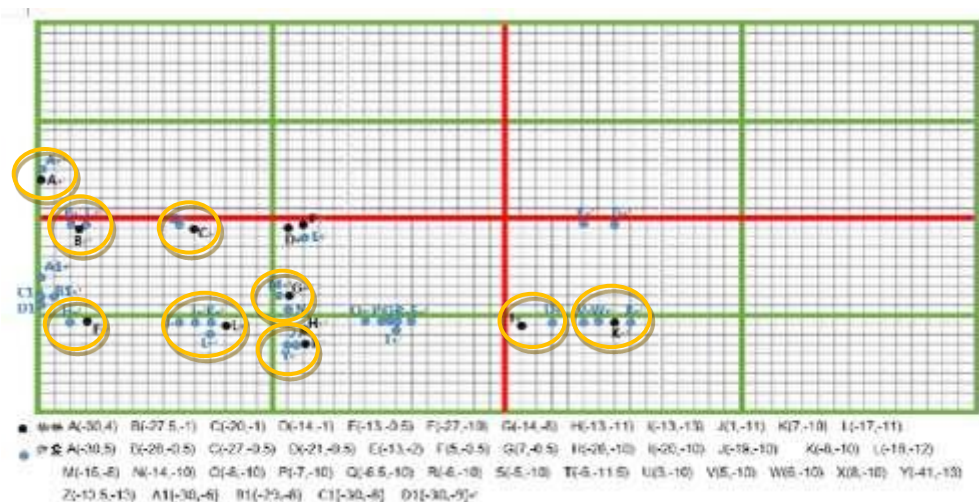


圖 2、學校活動中心雌性大姬蛛卵囊相對位置分布

一隻母蛛通常會保護一顆到四顆的卵囊，並且在護卵期間待在卵的旁邊不移動。其食用過的昆蟲屍體，會被網中廢棄的絲與灰塵包覆，其後掉落在蛛網的下方。卵囊的小蜘蛛孵化後，會散布在原本卵囊的周圍，或遷移到母蛛的主網上。大姬蛛產卵囊數量平均為一顆，且母蛛離卵囊的距離最近，其保護的效果也最佳。

在研究母蛛與卵囊的過程中，發現大姬蛛蛛網，有別於一般校園中其他常見的肩斑銀腹蛛以及簷下姬鬼蛛的二維(2D)圓形平面網，屬於三維(3D)立體不規則的結構網。蜘蛛網是多功能結構，網中的蜘蛛絲必須足夠堅固以承受蜘蛛的重量，諸如風荷載或碎屑衝擊之類的環境威脅，其主要功能是消散衝擊獵物的動能，以達到最小化結構損壞狀況。蜘蛛絲非凡的力量和延展性是因為很多因素造成的。然而，蜘蛛網拓撲結構，在獵物撞擊時是十分重要的，其蛛網不同絲線的分布會發揮緩衝撞擊的作用。蜘蛛網幾何形狀的微小變化，會影響蜘蛛網狀物的捕食能力(Soler and Zaera, 2016)。

一般而言，蜘蛛和牠們的網構成了理想的模型系統。在該模型系統中，可以研究無脊椎動物的行為靈活性和空間認知。許多研究表明，蜘蛛能夠適應一系列不同條件，修改其網的幾何形狀。然而，在這些認知受限的動物中，這種令人印象深刻的蛛網建構靈活性，然而其背後的機制仍未得到很好的探索。一種可能的機制為，蜘蛛探索其周圍環境時進行空間學習。為了符合有限空間或避難所，大姬蛛靈活的適應環境，可以根據某些環境變化來調整其網的架構。有彈性的結網行為在有限制的環境中，通常是有利於生存的(Hesselberg, 2015)。

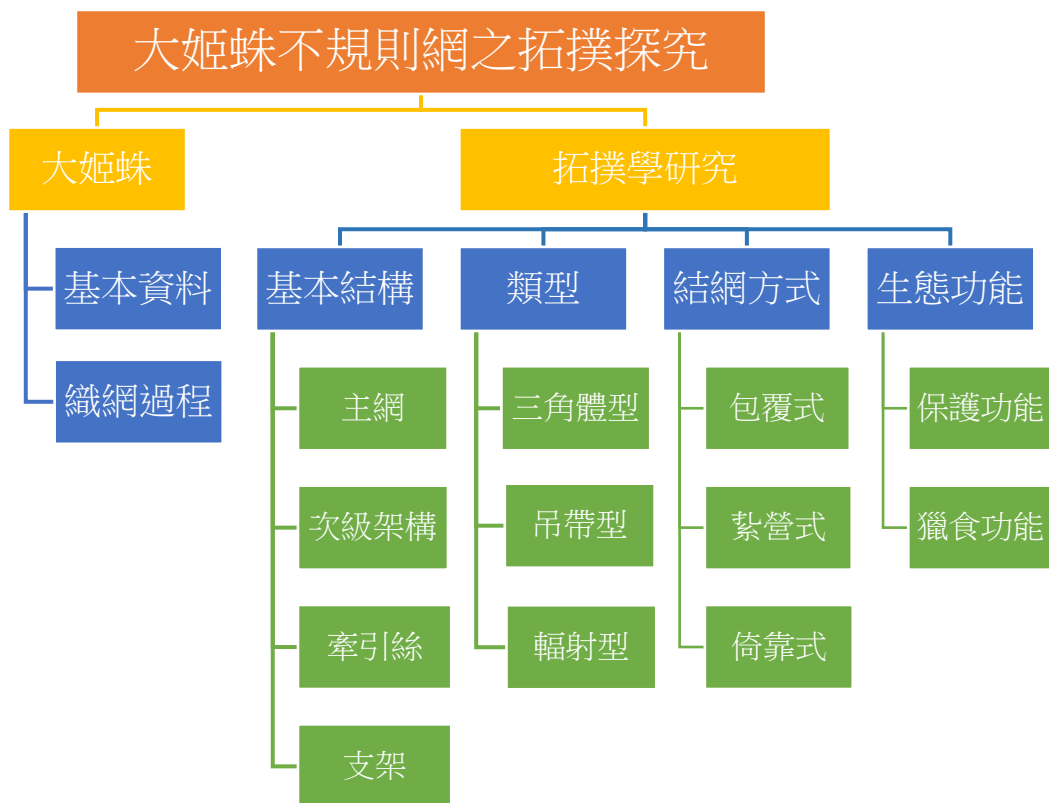
為了在不同的環境中生存，蜘蛛通過提供外殼，保護和捕獲獵物的有效工具來優化和調整其蛛網結構。研究最多的網是二維(2D)圓網，它由徑向和螺旋絲組成。然而，有些蜘蛛其蛛網為三維(3D)立體，例如漏斗，圓錐形或是帳篷型，其結構上更加豐富。蛛網的複雜空間網絡和尺度尺寸，對於 3D 蛛網的拓撲結構分析是重大挑戰(Su *et al.*,2018)。

二、研究目的

之前的研究中，很少探討三維(3D)立體不規則網的構造與型式，以及立體網在生態上的功能。基於此，本研究目的為：

- (一) 觀察大姬蛛三維(3D)立體不規則網之結網的過程
- (二) 使用幾何方分析式將大姬蛛三維(3D)立體不規則網具體化，定義其型態特徵。三維(3D)立體不規則網基本架構變因分析：立體主網拓撲形狀、最大投影面積、主網面積、支架絲數量、牽引絲數量、連結點數及網高指數。
- (三) 檢測大姬蛛在不同空間中，建立蛛網的方式和調整蛛網以適應空間限制的能力。
- (四) 探討大姬蛛不同生態功能網的轉換過程與型態的改變。

三、研究架構圖

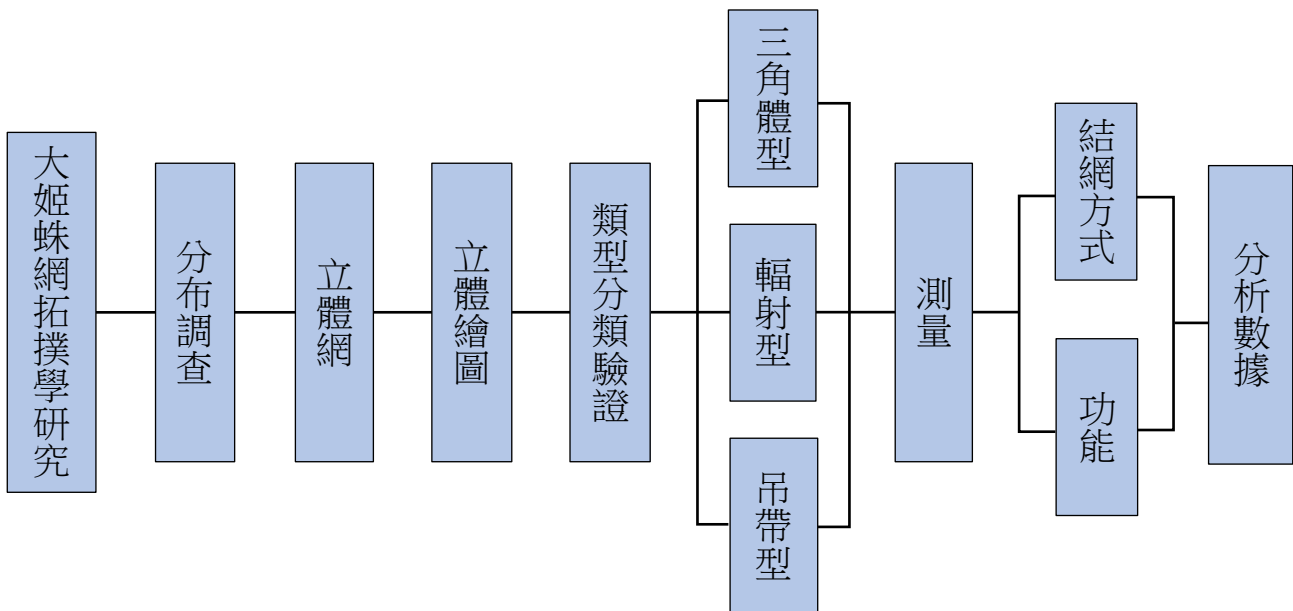


貳、研究方法與過程

一、研究物種

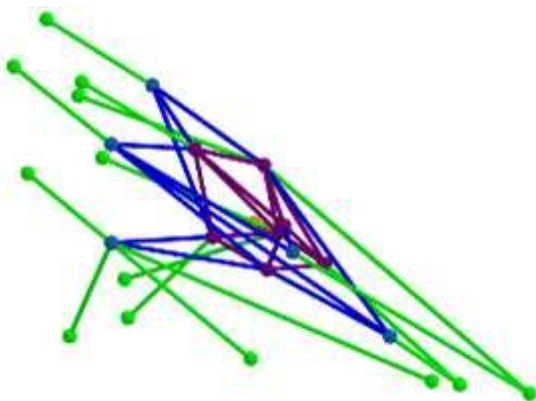
大姬蛛 <i>Parasteatoda tepidariorum</i>			雌性大姬蛛	雄性大姬蛛
界	動物界 Animalia	分布：低海拔山區		
門	節肢動物門 Arthropoda	網型：不規則		
綱	蛛形綱 Arachnida	體長：6-8mm		
目	蜘蛛目 Araneae	外觀：頭胸部紅褐色，腹部球型，腹背前半灰褐色，後半暗紅色密佈白色的斑點，中央有一枚倒 V 字型的白斑，上下各有 2 枚醒目白斑，腹端有一條黑色橫斑。		
科	姬蛛科 Theridiidae			
屬	希蛛屬 Achaearanea			
種	大姬蛛 <i>Parasteatoda tepidariorum</i>			

二、研究流程架構圖

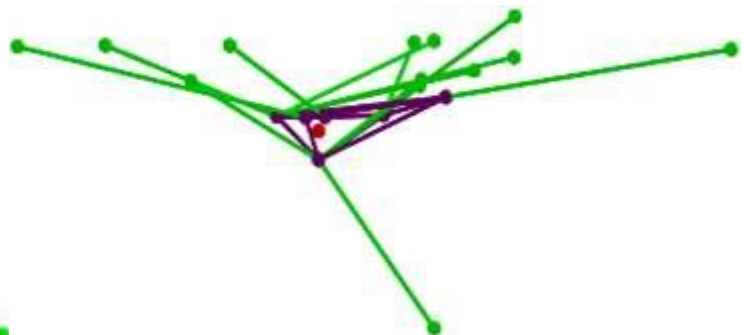


研究中依據外觀上的差異，將大姬蛛網分成三大類型，並觀察、驗證及計算，找出不同類型中結網方式與功能上的差異。

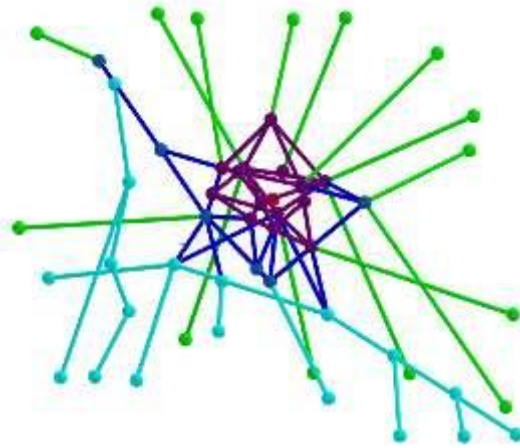
用 GGB 模擬的三角體型網



用 GGB 模擬的吊帶型網



用 GGB 模擬的輻射型網



三、研究流程

(一) 何謂拓撲學？在數學裡，拓撲學（英語：topology），是一門研究拓撲空間的學科，主要研究空間內，在連續變化下維持不變的性質。在拓撲學裡，重要的拓撲性質包括連通性與緊緻性。拓撲學是由幾何學與集合論裡發展出來的學科，研究空間、維度與變換等概念。雖然直到 20 世紀初，拓撲空間的概念才開始發展起來。到了 20 世紀中葉，拓撲學已成為數學的一大分支。本實驗以幾何拓撲學為主，主要研究型態與其對其他型態的嵌入。幾何拓撲學中一個特別活躍的領域為「低維拓撲學」，研究四維以下的型態。〈資料來源：維基百科〉

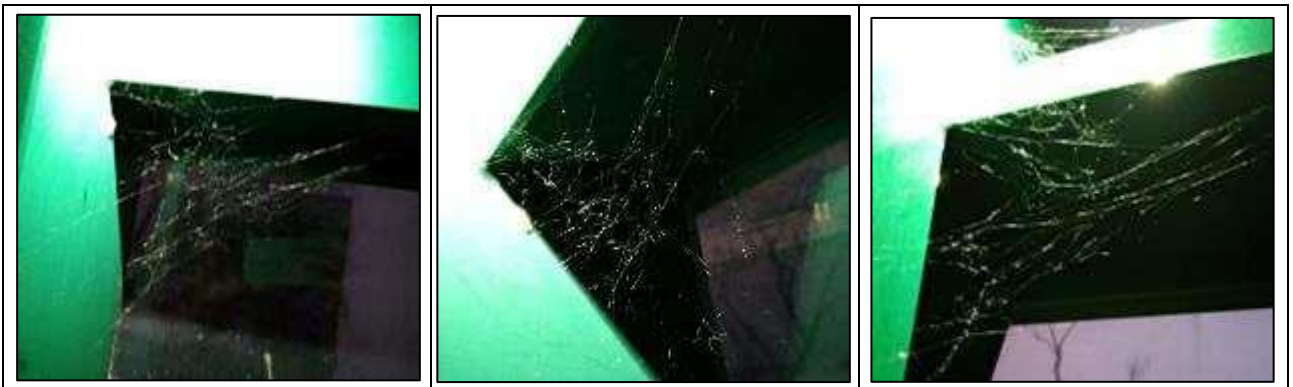
(二) 大姬蛛結網過程

將大姬蛛放入設計好的實驗箱中，觀察蜘蛛織網的過程，並且攝影後，再繪製出大姬珠的結網過程。

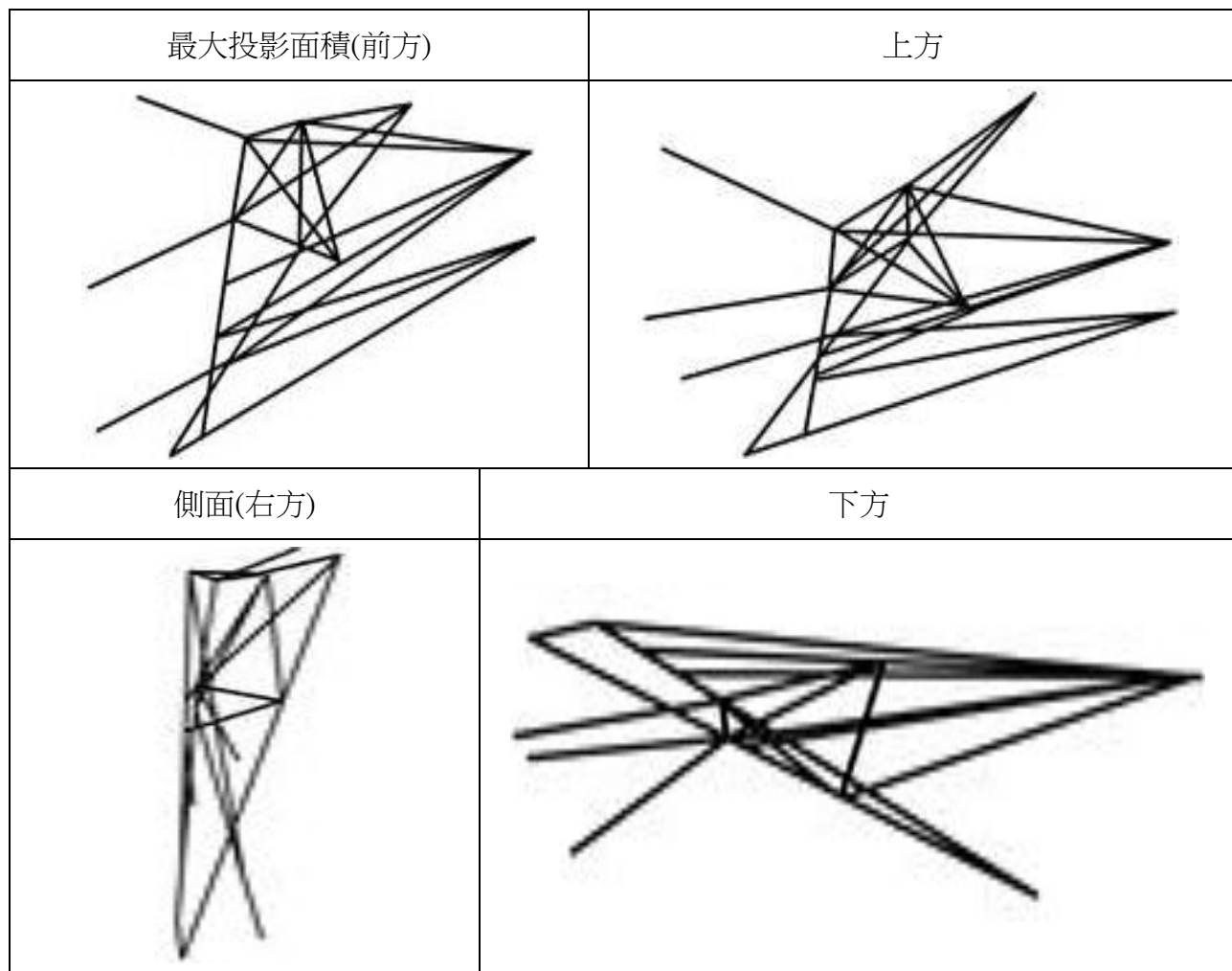
(三) 繪製立體大姬蛛網

為了方便觀察立體網，將立體網繪製在 GeoGebra(GGB)程式中，並依照繪製出的 GGB 立體網，建模在 Tinkercad 程式中，用 3D 列印機將模擬的蛛網實體化。過程如下：

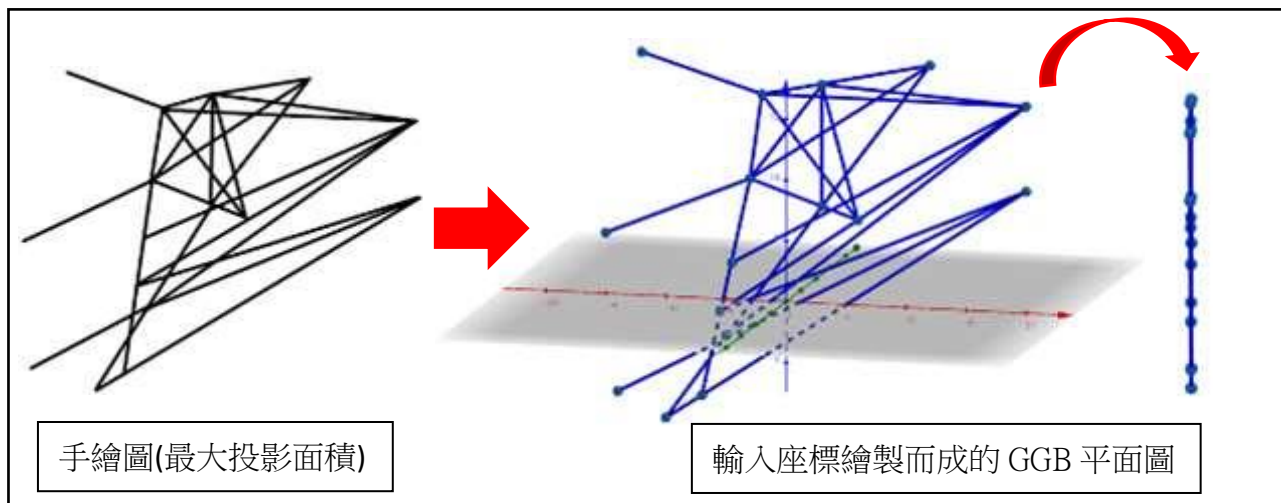
1.到戶外拍攝立體大姬蛛網各個角度的照片，並手繪蛛網的形狀。



2.將拍攝下來的照片與手繪圖仔細比對，再將主要的蛛絲與結構繪製成 GGB 立體圖基礎的手繪圖。

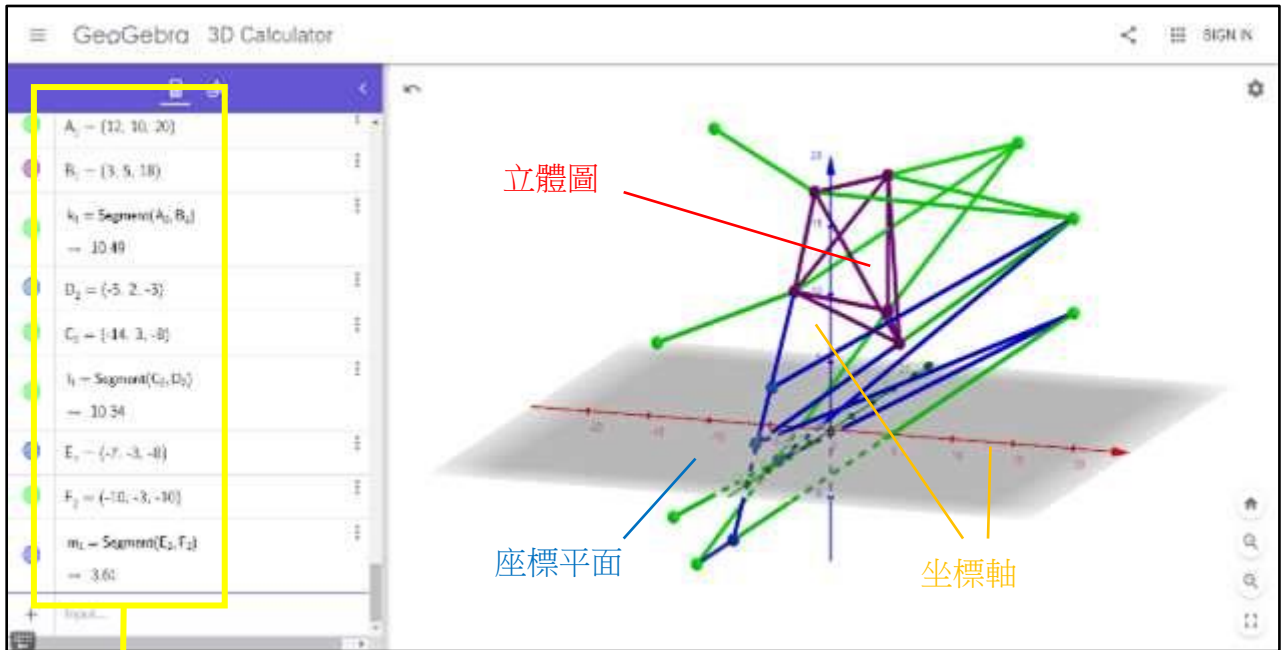


3.將正面的手繪圖，依實際公分數，算出所有線兩端點的 XYZ 座標。在 GGB 程式中，先插入兩個質點在平面上，輸入質點的 X 與 Z 座標，且 Y 座標皆設為 0，連結質點完成線段，繪製成 GGB 平面圖。



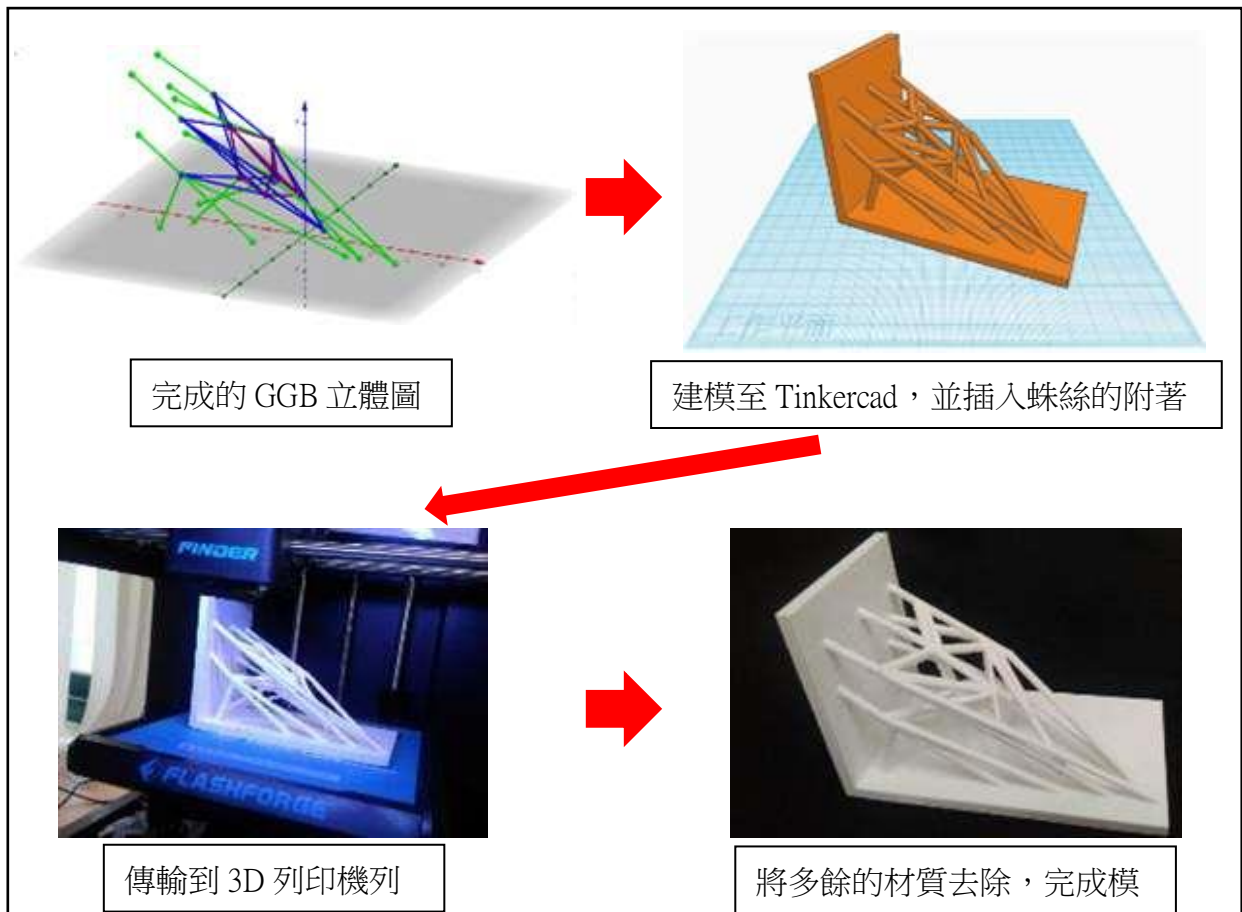
將手繪圖繪製於 GGB 當中

4. 比對其他方位的手繪圖，更改質點的 Y 座標，依不同的架構塗上不同的顏色，完成 GGB 立體圖。



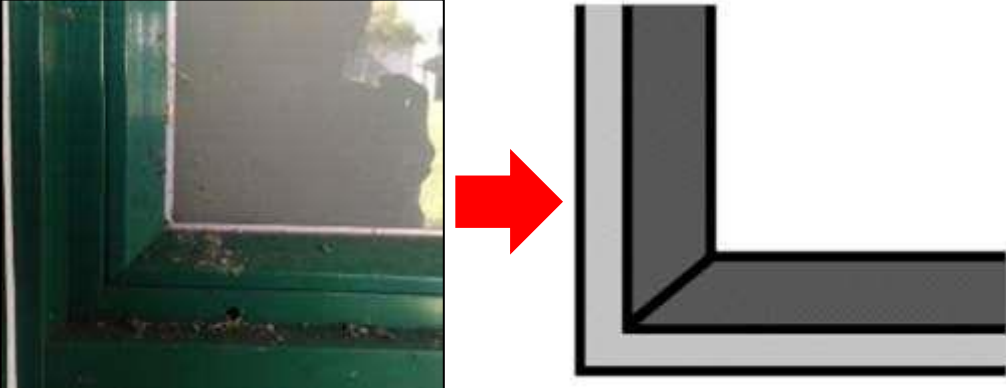
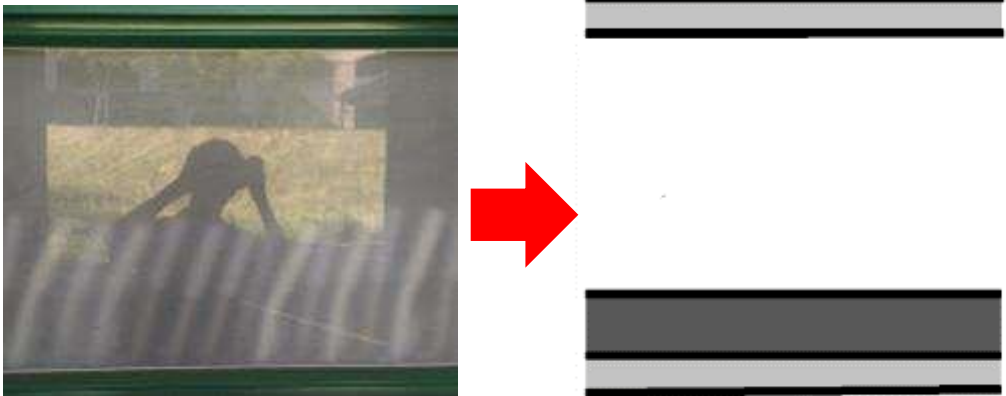
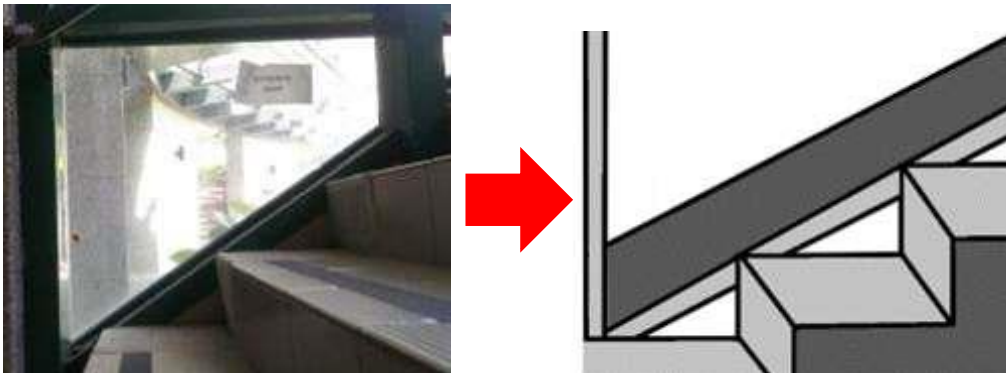
輸入線段兩端質點的 XYZ 座標，塗上不同架構的顏色，完成 GGB 立體圖。

5. 依照繪製出的 GGB 立體網，將等比例的蛛絲建模在 Tinkercad 程式中，並用 3D 列印機將模擬的蛛網實體化。



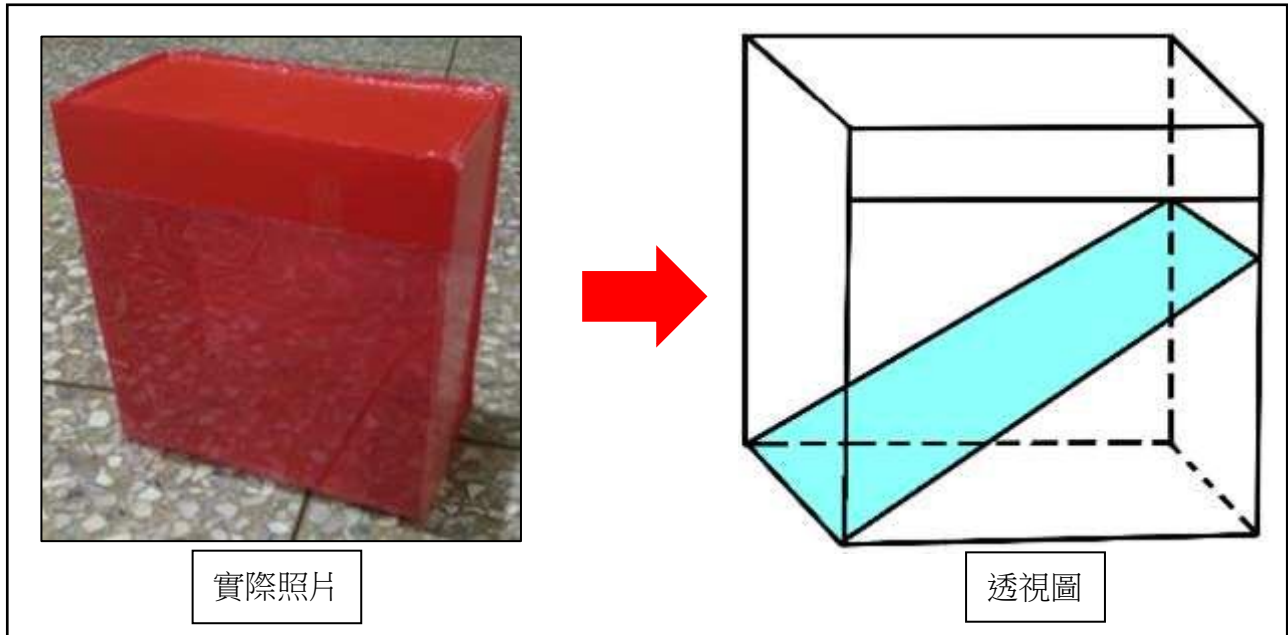
(四) 分類驗證

為驗證對於不同類型網的定義、大姬蛛野生跟人工環境結網是否有差異為目的，觀察大姬蛛結網的環境，並依據大姬蛛因環境的不同，而改變結網類型的特性，檢測大姬蛛在不同空間中，建立不同形式的蛛網和調整蛛網以適應空間限制的能力。在觀察結網的環境後，使用瓦楞板與透明片製作了三個相異方形實驗箱，來驗證結網的類型與觀察大姬蛛結網的過程。

	<p>三角體型大姬蛛網環境：需有一個等於或小於 90 度的夾角處，並有兩個附著面，如圖附著面為左與下。</p>
	<p>吊帶型大姬蛛網環境：無特殊要求的環境，只要最少有兩個附著面即可，如圖附著面為上與下。</p>
	<p>輻射型大姬蛛網環境：因輻射型所需的牽引絲最多，所以結網的環境相對需要很多附著面。</p>

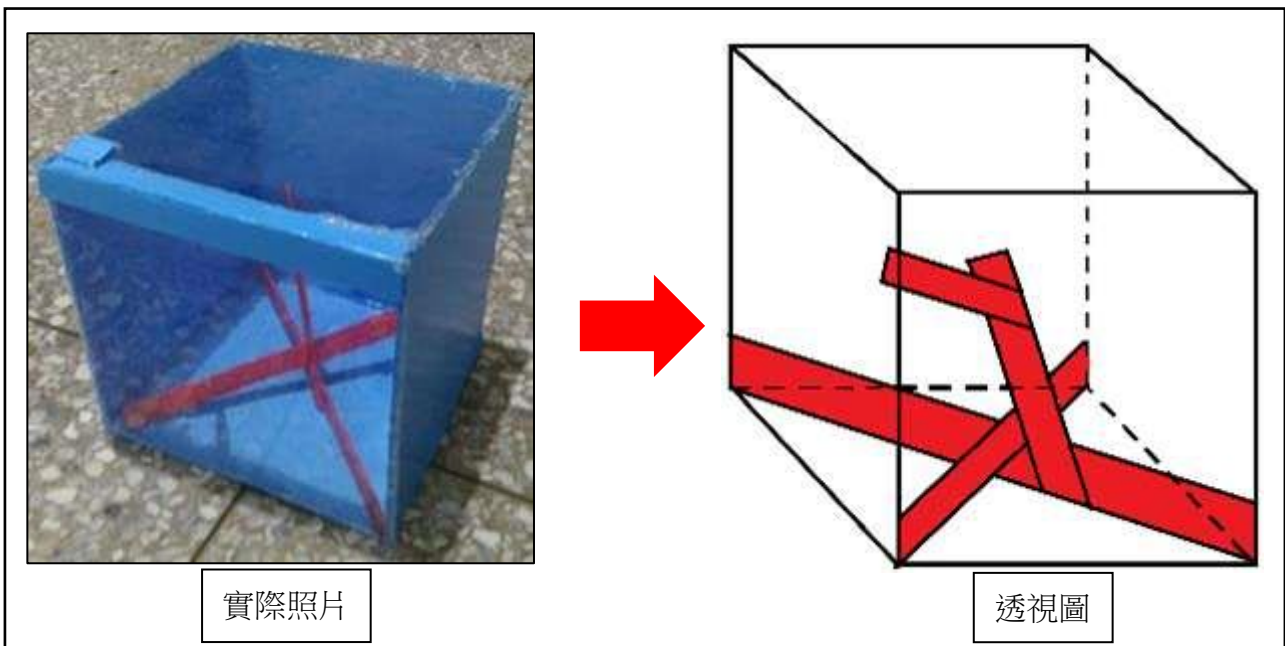
1.三角體型實驗箱

為了讓大姬蛛只能結出三角體型網，而降低結出其他種類的機會。研究中利用大姬蛛無法在透明板上附著蜘蛛絲的特性，在箱內插入一片透明板，形成一個三角的環境，使大姬蛛沒有上下兩個附著面來降低結出吊帶型網，也沒有太多的附著面可以結出輻射型網。



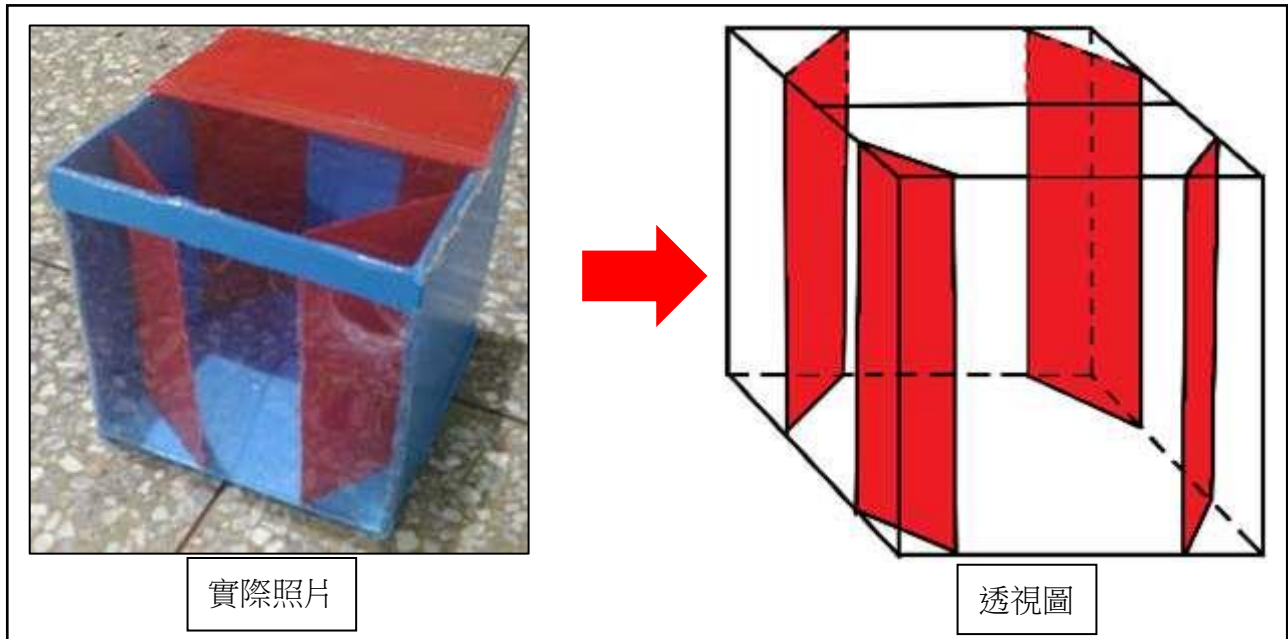
2.吊帶型實驗箱

避免大姬蛛結出輻射型網，研究中利用大姬蛛若要結出輻射型網，就必須有較大空間的特性。因此在實驗箱中放入許多樹枝，使箱內的環境雜亂。再用兩支較大的樹枝，交叉擺放，擋住箱內的夾角，降低結出三角體型的機會。



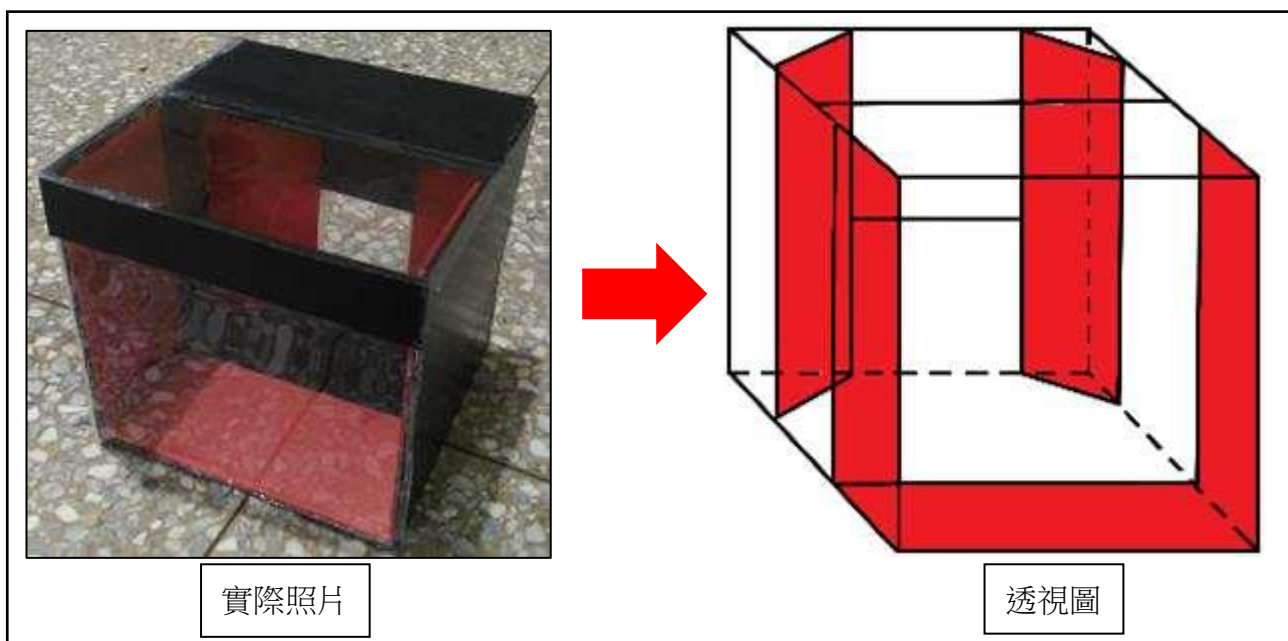
3.輻射型實驗箱

插入四片瓦楞板，擋住實驗箱內四個夾角，讓大姬蛛沒有等於或小於 90 度夾角可以結出三角體型網，再加入上方一片瓦楞板，增加多個附著面，讓大姬蛛可以更容易結出輻射型網。



(五) 模擬自然環境

研究中戶外的大姬蛛網，都結在人工建築中。自然環境中的大姬蛛網較難發現。所以製作的三種類型都可結出的實驗箱，模擬自然環境，計算不同類型的出現機率。



參、研究結果與討論

一、蜘蛛網的架構與特色

蜘蛛網是多功能結構，其主要功能是消散衝擊獵物的動能，以達到最小化結構損壞狀況。蜘蛛絲非凡的力量和延展性是因為很多因素造成的。然而，很明顯拓撲結構在撞擊時的結構性能是決定性的，並且不同絲線的佈置也會發揮作用。蜘蛛網的幾何形狀的微小變化會影響蜘蛛網狀物的捕食能力。大多常見的蜘蛛都是二維(2D)圓形平面網，而大姬蛛是結三維(3D)立體不規則網。

(一) 二維(2D)圓形平面網架構

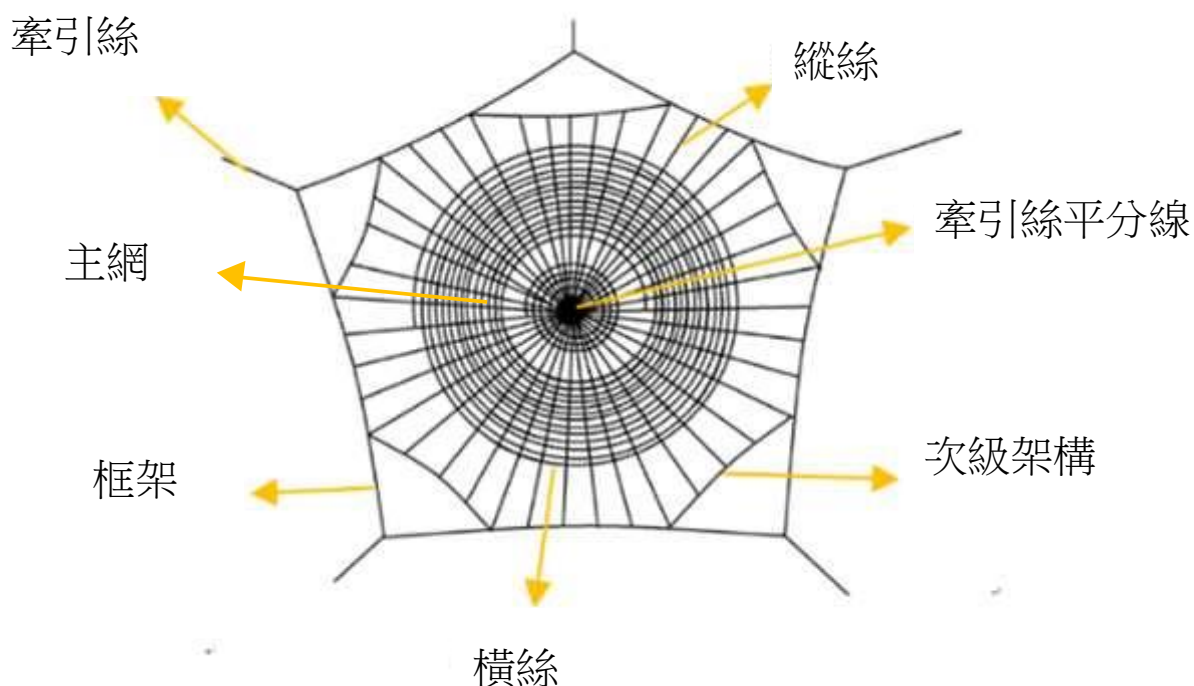


圖 3、二維(2D)圓形平面網架構(Soler and Zaera, 2016)

以圓網為例，如圖 3 所示，周圍的次級結構為牽引絲，並且構成框架，而穩固中間的主網結構。圓網是最常見的蜘蛛網，其結構已有很多人研究過，也因此我們對於不規則網產生好奇。

(二) 三維(3D)立體不規則網架構

研究中以圓型(2D)平面網的架構位置，來對比大姬蛛不規則立體網的架構，並探討不同架構的功能。

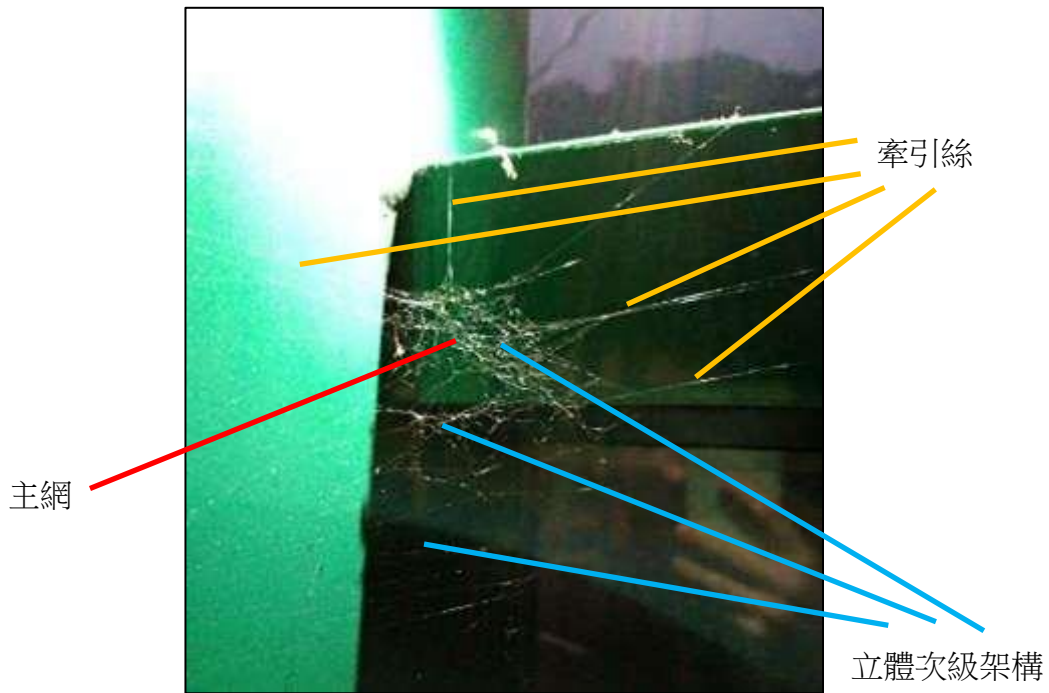


圖 4、三維(3D)立體不規則結構網架構

由圖 3 與圖 4 中可發現，平面網和立體不規則結構網的架構相似，而立體網相異於平面網的架構，是由多條蛛絲所組成的「支架」。如圖 5 所示。

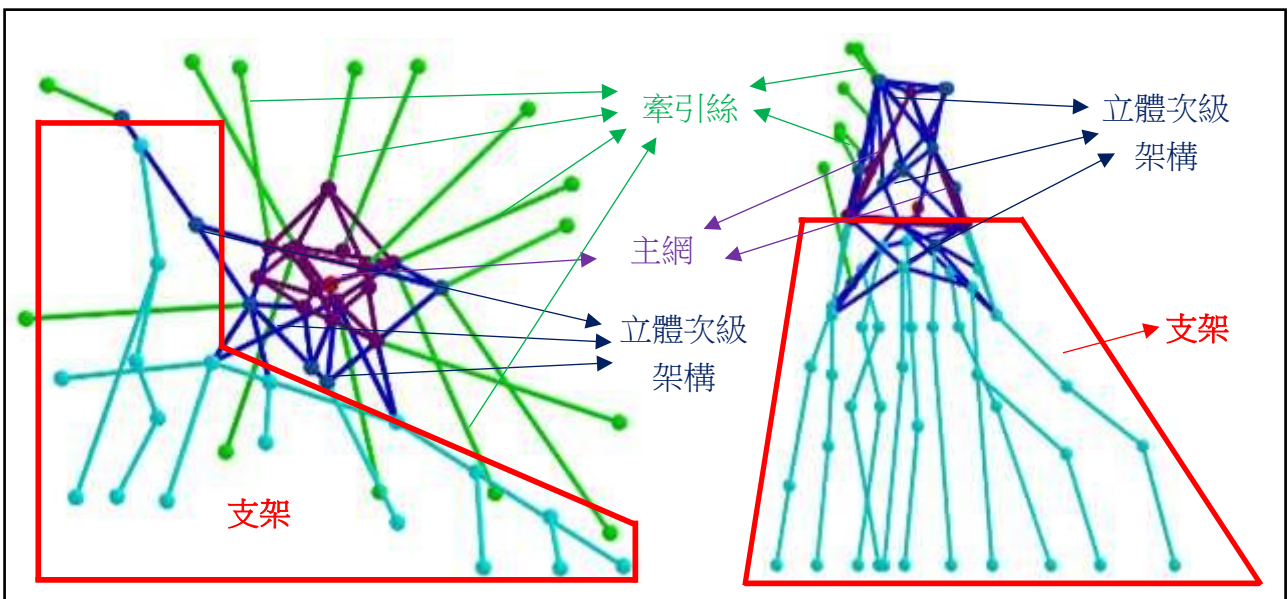
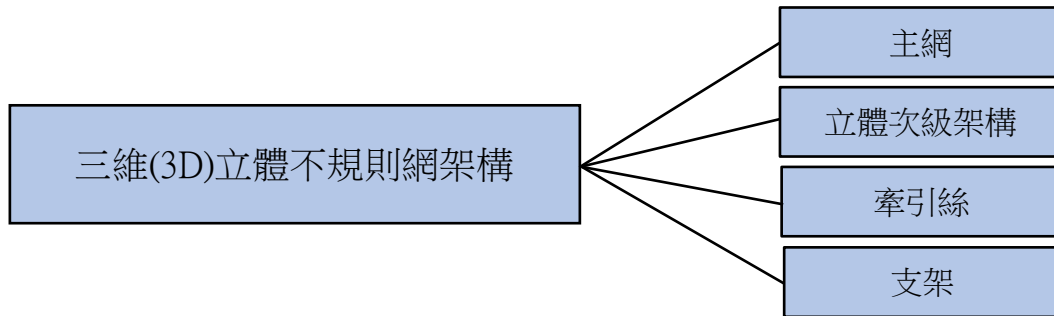


圖 5、三維(3D)立體不規則網支架

三維(3D)立體不規則網架構如下：



(三) 架構的定義及功能

研究中，觀察大姬蛛網的照片與 GGB 立體繪圖後，定義架構與功能上的差別。

1.主網：

(1)定義：蜘蛛所在位置中，第一層包覆著蜘蛛的架構，有不同拓撲形狀。

(2)功能：蜘蛛與卵囊的所在位置及主要獵食與保護卵囊的架構。

2.立體次級架構：

(1)定義：連接主網、牽引絲與支架之間的蛛絲，必為立體架構。

(2)功能：包覆整個主網，位於主網與牽引絲之間，可緩衝獵物衝向主網的撞擊，保護主網中的卵囊。

3.牽引絲：

(1)定義：蜘蛛網最外圍的絲，與附著面直接連接。是單一的絲線，非立體結構。

(2)功能：是蜘蛛網主要的支撐結構。

4.支架：

(1)定義：最後結出的架構，蛛絲往下延伸至地面。

(2)功能：為加強蜘蛛網而結出的支撐架構，並非所有的網都有。

將完成的 GGB 立體網，依不同的架構，塗上顏色。主網為紫色，立體次級架構為深藍色，牽引絲為綠色，支架為淺藍色。如圖 6 所示。

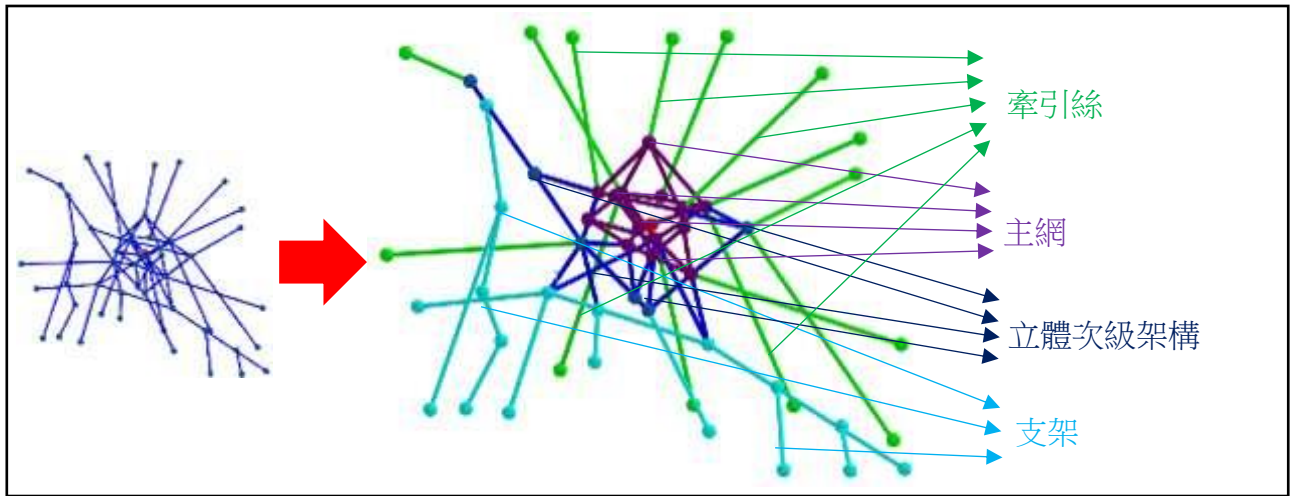
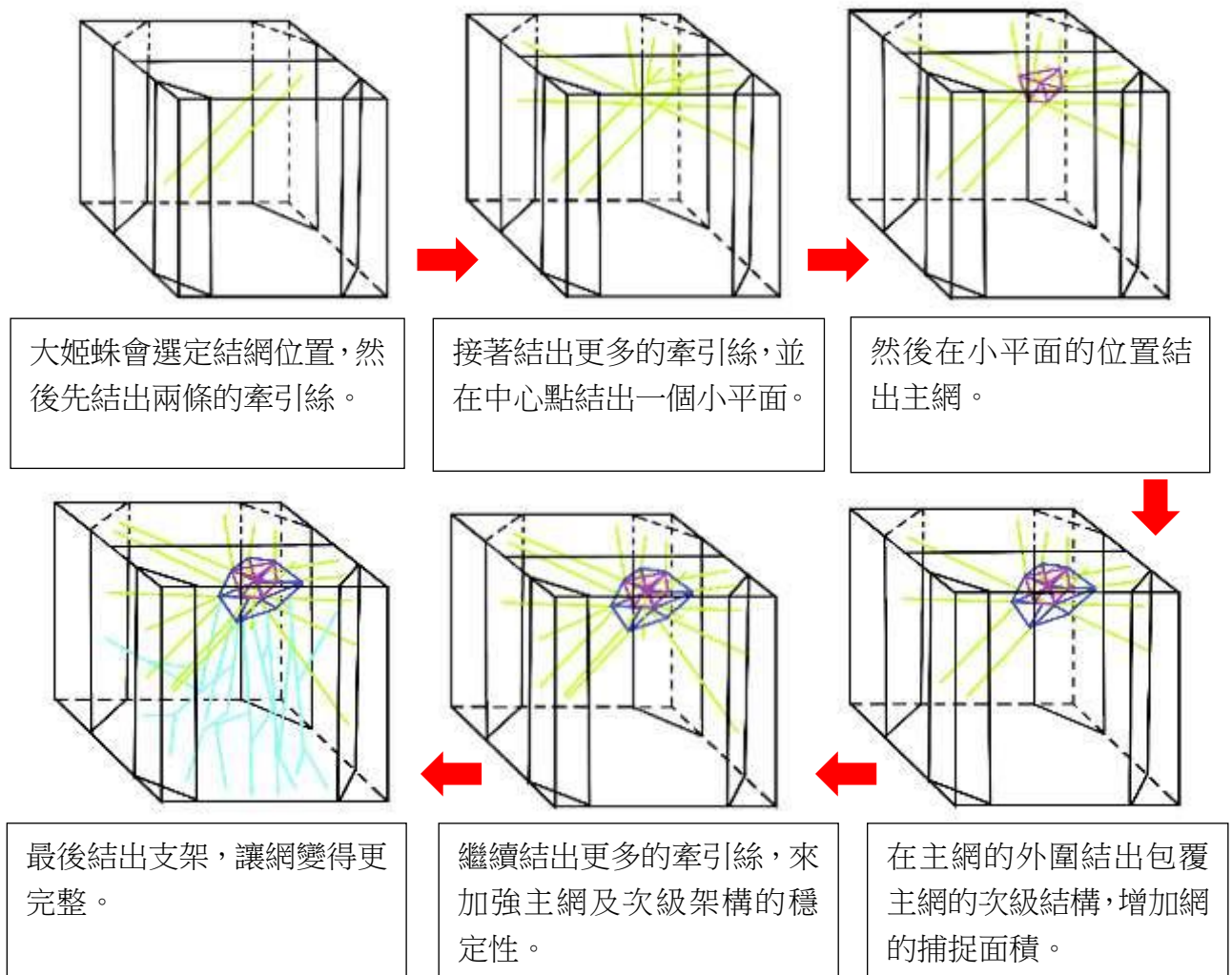


圖 6、不規則立體網架構的位置與顏色

二、大姬蛛結網過程

在實驗箱中，觀察結網的過程為：牽引絲 → 主網 → 立體次級架構 → 支架。



三、大姬蛛不規則立體網類型的定義、驗證及分析

大姬蛛因環境的不同，而改變結網類型的特性，所結的網為不規則立體網。在觀察 GGB 繪圖的網中，發現有特定規律的結網類型，分析統計蛛網的數據，並定義類型相似的網，並依據定義製作實驗箱來驗證。

(一) 不規則立體網定義

使用 GGB 完成 28 個立體結構的大姬蛛網，其中 20 個網為戶外環境中的網，另外 8 個網為捕捉野生的大姬蛛，放置在實驗箱中所結的網。如圖 7，依據不規則網最大投影面積的上、下、左及右的牽引絲附著面，將這 28 個網歸納分類成三種類型：三角體型、吊帶型、輻射型。

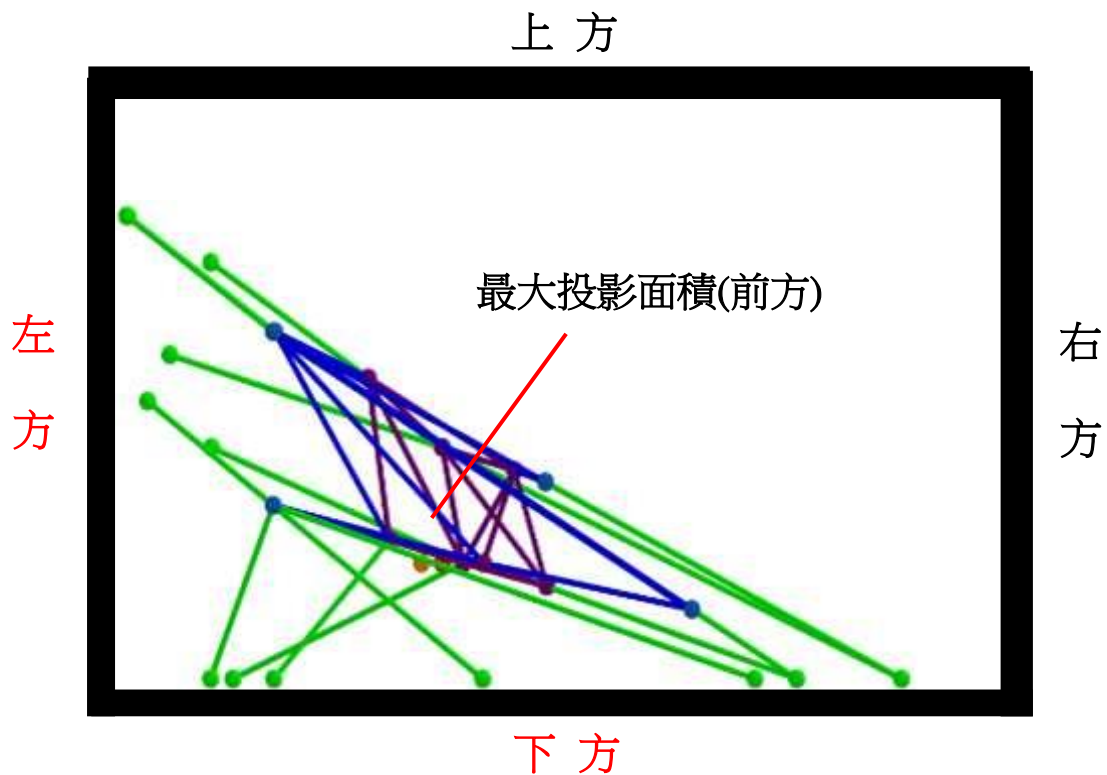


圖 7、牽引絲附著面

研究中以蛛網最大投影面積(前方)的平面圖，來判斷該網的牽引絲附著面。如圖 7，牽引絲附著面為左方與下方。

1.三角體型定義：牽引絲的附著面最少必須滿足下列四種條件其中之一：左與下、左與上、右與上、右與下。必須有主網及立體次級架構。蜘蛛網的環境必須在有一個等於或小於90度的夾角處。如圖8。

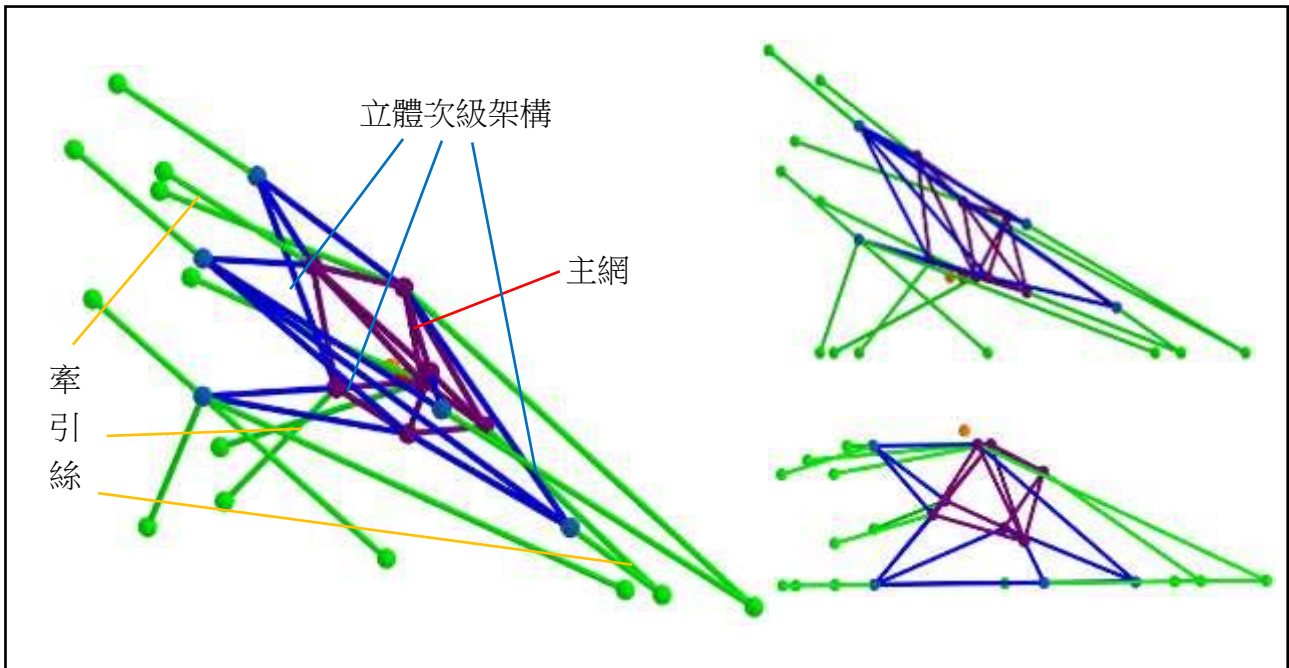


圖8、大姬蛛不規則三角體型網

2.吊帶型定義：牽引絲附著面至少有兩面，且不固定。必須有主網，但沒有立體次級架構。如圖9。

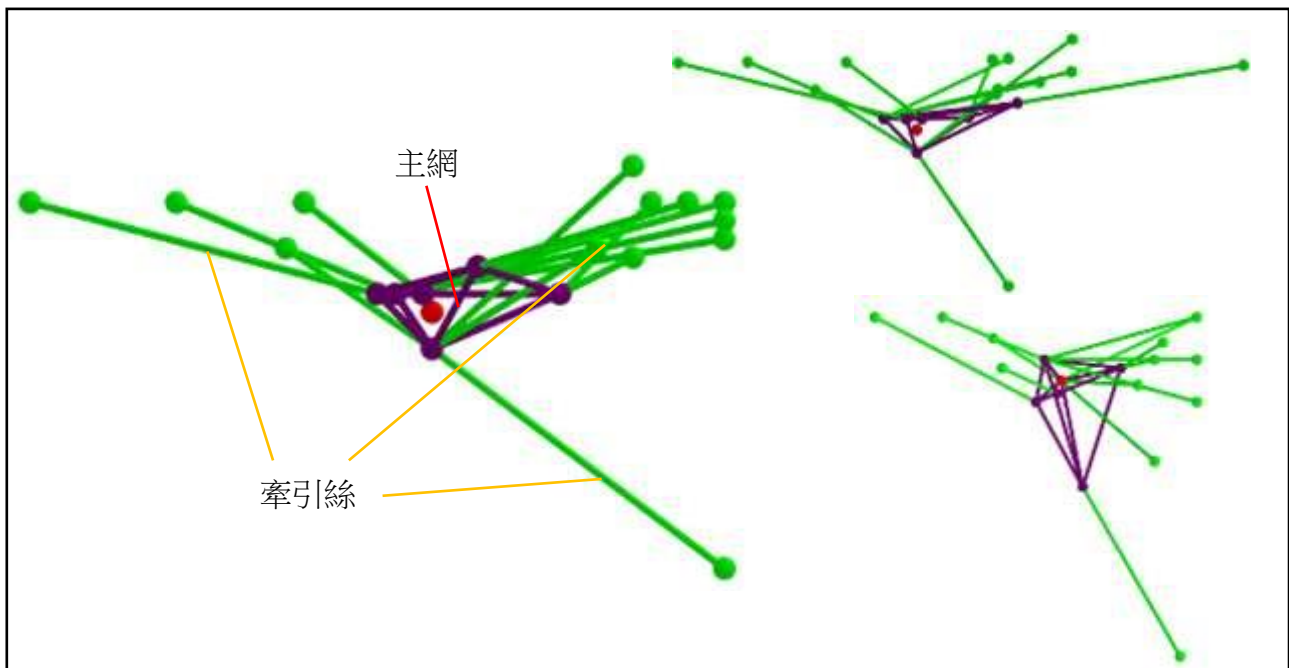


圖9、大姬蛛不規則吊帶型網

3.輻射型定義：牽引絲的附著面一定要有上、下、左、右。必須有主網及立體次級架構。如圖 10。

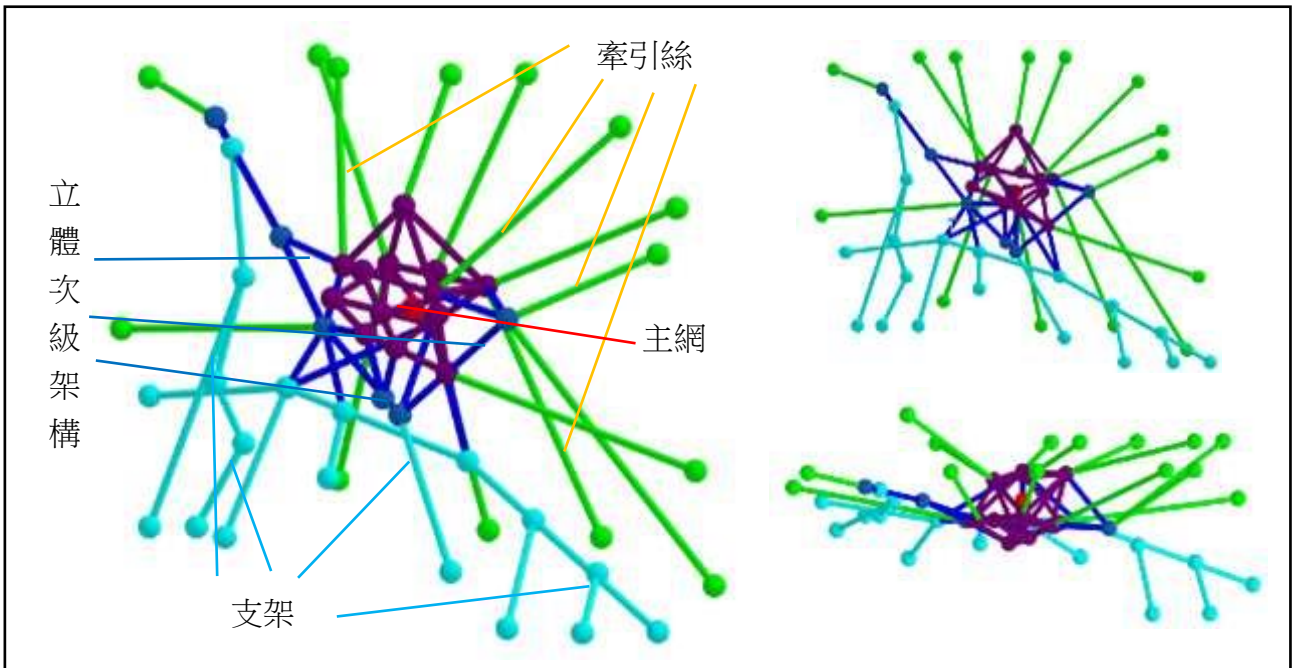
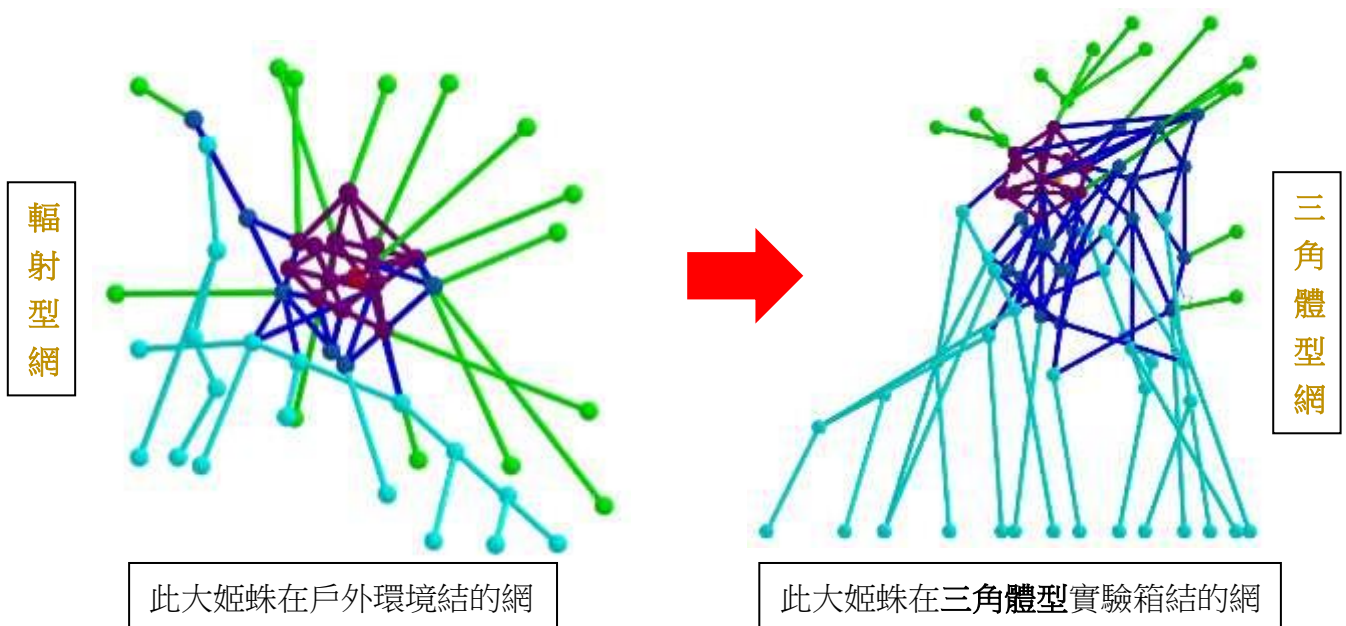


圖 10、大姬蛛不規則輻射型網

(二) 類型定義驗證

研究中將戶外環境原本大姬蛛所結的網記錄下來，並放置到設計的實驗箱，其結網的外型結構產生改變。放置在三角體型環境中，大姬蛛結出三角體型網；放置在吊帶型環境，大姬蛛結出吊帶型網；放置在輻射型環境，大姬蛛結出輻射型網。顯示大姬蛛在不同環境下會依照環境，而改變蜘蛛網外型，以此驗證實驗中類型的定義是正確的。如圖 11。



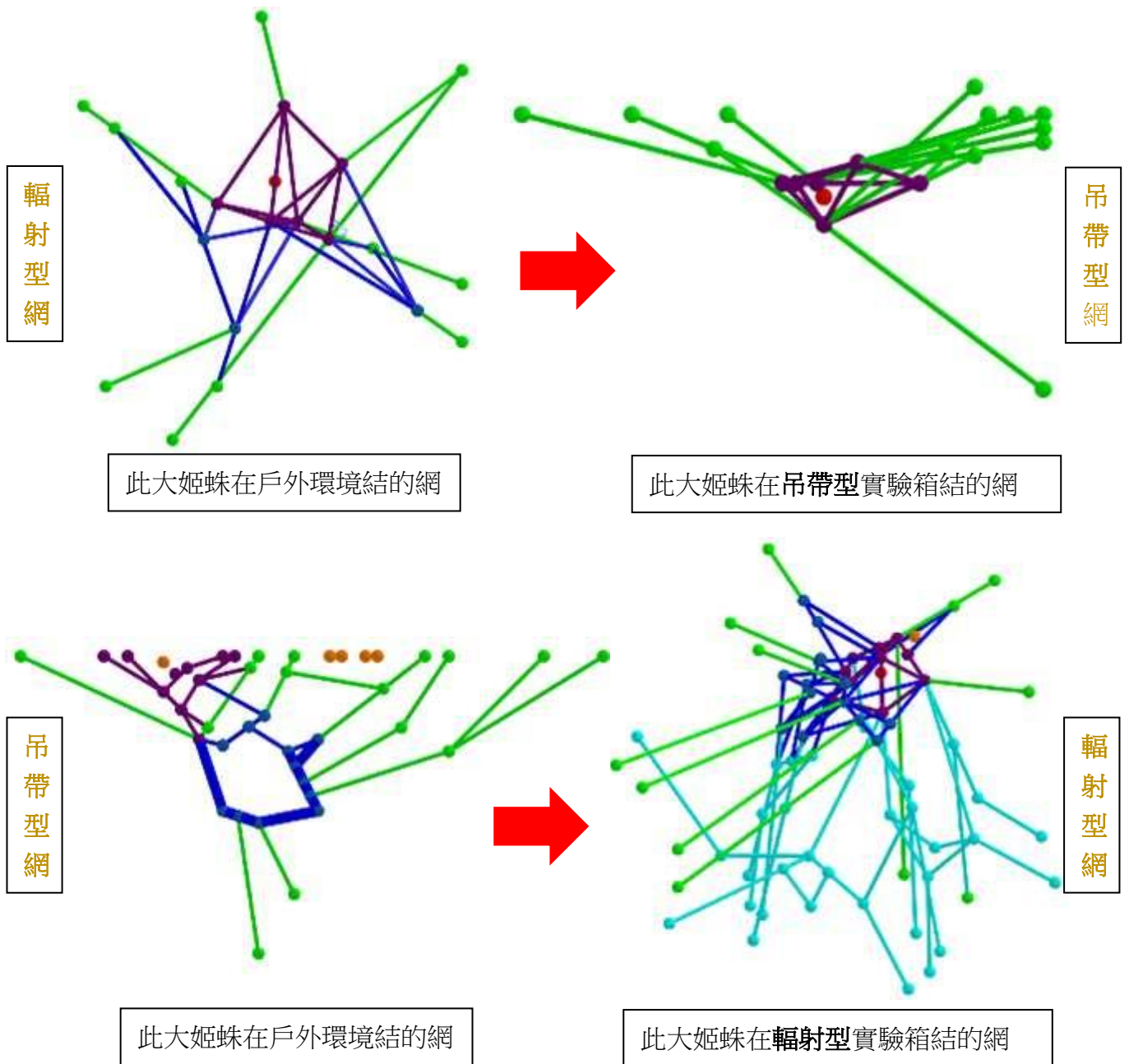


圖 11、大姬蛛在戶外與實驗箱中結網的變化

如圖 11 所示，大姬蛛會依照不同的環境，結出相對應的網型。在有一個等於或小於 90 度的大夾角處，並且沒有其他夾角時，當結網環境滿足牽引絲的附著方位在左與上、左與下、右與上、右與下其中之一的條件時，大姬蛛會結出三角體網型。在附著面多的環境，可以同時滿足牽引絲附著方位在上、下、左、右時，大姬蛛容易結出輻射型網。在附著面不多的地方時，大姬蛛若想結出輻射型網，一樣必須滿足牽引絲的 4 個附著方位，此時大姬蛛必須加長牽引絲，來產生 4 個附著方位，如此一來，大姬蛛的輻射型網就會變得較大。在任何環境下，大姬蛛都可以結出吊帶型網，只要滿足任何兩個牽引絲的附著方位。然而吊帶型網沒有次級架構，所以整體結構較不完整，也較為脆弱。通常環境太過嚴苛，或是蜘蛛本身的絲量

不足，大姬蛛才會結出吊帶型網。

(三) 三大類型中的差異性

研究中，觀察 GGB 繪製的網，並計算每個網的最大投影面積、主網拓撲形狀種類的數量、支撐絲總數、含支架網百分比及連結點總數，探討三大類型的差異性。

1. 最大投影面積

最大投影面積也是蛛網的最大捕食面積，每個網的面積以幾何方式計算，並平均三大類型網的最大投影面積。如表 1。

表 1、最大投影面積

三角體型		吊帶型		輻射型	
編號	最大投影面積 cm ²	編號	最大投影面積 cm ²	編號	最大投影面積 cm ²
1	90	1	100.33	1	123.2
2	106.25	2	101.78	2	165
3	131.25	3	76	3	135.9
4	129.8	4	108	4	80.98
5	234	5	252.5	5	216
6	149.76	6	103.7	6	162.4
7	133.66	7	129.6	7	162
8	131.99	8	118.32	8	194.4
9	130.72				
三大類型最大投影面積平均 cm ²					
137.49223		123.77875		154.985	

如表 1 所示，最大投影面積平均：輻射型>三角體型>吊帶型。面積愈大，所需的支撐力也愈大，輻射型>三角體型>吊帶型。吊帶型因沒有立體次級架構，蛛網的架構較不完整，若網過大，可能導致蛛網不夠穩固，進而影響卵囊的安全，並降低消散衝擊獵物的動能。因此吊帶型為三種類型中，最大投影面積最小的網型。依據研究中的定義，要結出輻射型網，所需的牽引絲附著面最多，因此支撐絲較多，有較大的支撐力，可結出較穩固且較大的網。

2.含支架網百分比

表 2、含支架網百分比

類型	三角體型	吊帶型	輻射型
網總數	9	8	8
結有支架網總數	3	3	5
百分比	33.3%	37.5%	62.5%

如表 2 所示，含支架網百分比：輻射型>三角體型>吊帶型。支架是為了加強網的穩固所結的架構。從上述推測，相對於最大投影面積的大小，所需的支撐力輻射型為最大，故輻射型相較於另外兩種網型，支架出現的機率較大。

3.支撐絲總數

支撐絲為牽引絲與支架兩種支撐架構的蛛絲數量總和，計算每個網支撐絲的數量，並平均三大類型網的支撐絲總數。如表 3。

表 3、支撐絲總量

三角體型		吊帶型		輻射型	
編號	支撐絲總數	編號	支撐絲總數	編號	支撐絲總數
1	14	1	10	1	15
2	15	2	11	2	8
3	11	3	7	3	16
4	9	4	10	4	15
5	18	5	20	5	23
6	27	6	9	6	13
7	17	7	19	7	21
8	17	8	19	8	38
9	14				
三大類型支撐絲總數平均					
15.777		13.125		18.6	

如表 3 所示，支撐絲總數平均：輻射型>三角體型>吊帶型。輻射網所需要的牽引絲附著面為最多，且支架的出現率最高，因此支撐絲總數較多。三角體型網與吊帶型網，雖然所需要的牽引絲附著面最少都為兩面，但三角體型網的最大投影面積較大，且有立體次級架構，因此所需的支撐力比吊帶型網大，故支撐絲總數較多。依據支撐絲總數平均，穩定性與支撐力：輻射型>三角體型>吊帶型。

4.連結點總數

連結點總數是立體次級架構的連結點數，及支撐絲直接連接於主網的連結點數總和。

表 4、連結點總數

三角體型		吊帶型		輻射型	
編號	連結點總數	編號	連結點總數	編號	連結點總數
1	14	1	10	1	15
2	15	2	11	2	8
3	11	3	7	3	16
4	9	4	10	4	15
5	18	5	20	5	23
6	27	6	9	6	13
7	17	7	19	7	21
8	17	8	19	8	38
9	14				
三大類型連結點總數平均					
15.777		13.125		18.6	

如表 4 所示，連結點總數平均：輻射型>三角體型>吊帶型。連結點愈多，網就愈複雜，複雜度：輻射型>三角體型>吊帶型。輻射型與三角體型皆有立體次級架構，但輻射型的支撐絲較多，所以連結點總數相較於三角體型的多，而沒有立體次級架構的吊帶型，連結點總數為最少。連結點數愈多，複雜度愈高，消散衝擊獵物的動能的效果愈好，保護能力也越好。保護能力：輻射型>三角體型>吊帶型。所需的支撐力：輻射型>三角體型>吊帶型。

輻射型網的最大投影面積最大，且所需的牽引絲附著面最多，因此支撐絲總數較多，以增加支撐力，支撐絲總數較多，故連結點總數也較多。所以將三大類型的牽引絲總數與連結點總數做相關性分析。如圖 12、13 及 14。

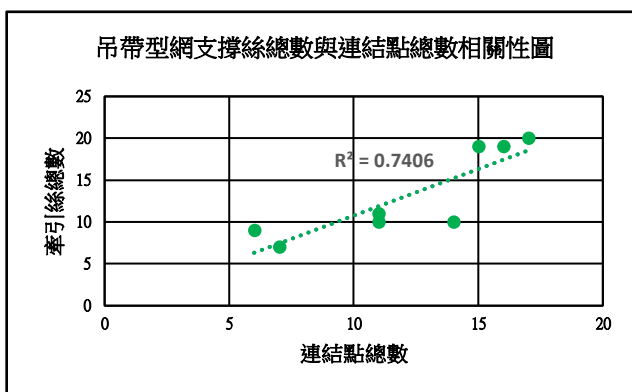
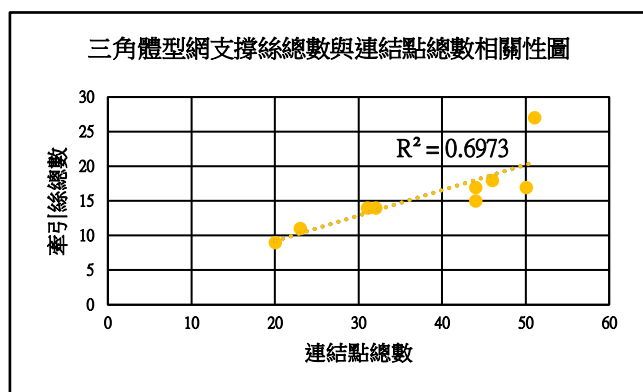


圖 12、三角體型網支撐絲與連結點相關性圖

圖 13、吊帶型網支撐絲與連結點相關性圖

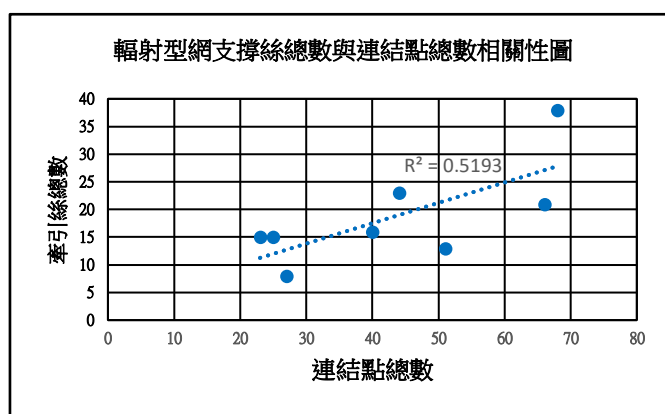


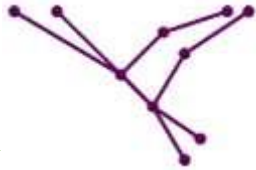
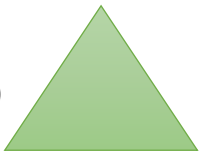
圖 14、輻射型網支撐絲與連結點相關性圖

如圖 12、13 及 14 所示，三大類型網的支撐絲總數與連結點總數做相關性分析，發現 R^2 都大於 0.5，都呈正相關。不論是何種大姬蛛網的類型，支撐絲總數愈多，連結點總數也會愈多。

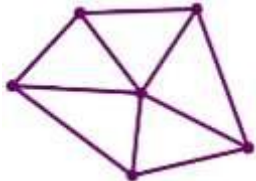
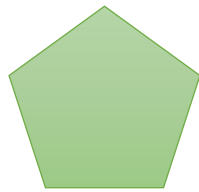
5.主網拓撲形狀

使用 GGB 觀察立體主網的形狀是幾面體，並上網查詢，其主網的拓撲種類。拓撲式的每個數字，為立體主網其中一面的頂點數。拓撲形狀中，相同的種類形狀，會因組成面的形狀不同，而分類不同。如圖 15。

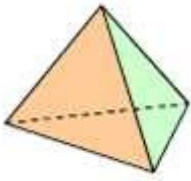
形狀:三角形
 一面體
 拓撲式:3
 三角體型持有數:0
 輻射型持有數:0
 吊帶型持有數:3



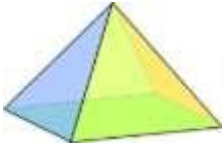
形狀:五角形
 一面體
 拓撲式:5
 三角體型持有數:0
 輻射型持有數:1
 吊帶型持有數:1



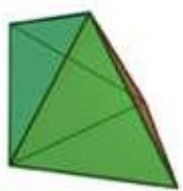
形狀:三角椎
 四面體
 拓撲式:3,3,3,3
 三角體型持有數:1
 輻射型持有數:0
 吊帶型持有數:1



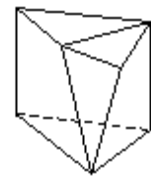
形狀:稜椎體
 五面體
 拓撲式:4,3,3,3,3
 三角體型持有數:5
 輻射型持有數:1
 吊帶型持有數:2



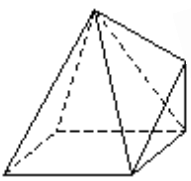
形狀:雙三角椎
 六面體
 拓撲式:3,3,3,3,3,3
 三角體型持有數:1
 輻射型持有數:2
 吊帶型持有數:0



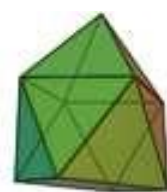
形狀:三角椎柱(1)
 七面體
 拓撲式:4,4,4,3,3,3,3
 三角體型持有數:1
 輻射型持有數:2
 吊帶型持有數:0



形狀:三角椎柱(2)
 七面體
 拓撲式:4,3,3,3,3,3,3
 三角體型持有數:0
 輻射型持有數:1
 吊帶型持有數:1



形狀:詹森多面體(1)
 九面體
 拓撲式:4,3,3,3,3,3,3,3,3
 三角體型持有數:0
 輻射型持有數:1
 吊帶型持有數:0



形狀:詹森多面體(2)
 九面體
 拓撲式:4,4,4,3,3,3,3,3,3
 三角體型持有數:0
 輻射型持有數:1
 吊帶型持有數:0



形狀:雙椎體
 十面體
 拓撲式:3,3,3,3,3,3,3,3,3,3
 三角體型持有數:0
 輻射型持有數:1
 吊帶型持有數:0



形狀:空間充填多面體
 十一面體
 拓撲式:4,4,4,4,4,4,3,3,3,3,3
 三角體型持有數:0
 輻射型持有數:1
 吊帶型持有數:0



形狀:雙四角椎柱
 十二面體
 拓撲式:4,4,4,4,3,3,3,3,3,3,3,3
 三角體型持有數:1
 輻射型持有數:0
 吊帶型持有數:0

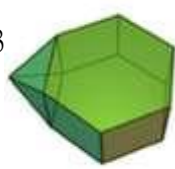


圖 15、大姬蛛主網拓撲形狀(維基百科)

如圖 15 所示，主網的形狀可分為 12 種立體拓撲形狀。其中三角體型的蛛網，其主網有四種不同的拓撲結構；輻射型的蛛網，其主網有七種不同的拓撲結構；吊帶型為外型架構的蛛網，其主網有四種不同的拓撲結構。如圖 16。而立體主網架構中，以稜椎體的數量為最多。如圖 17。

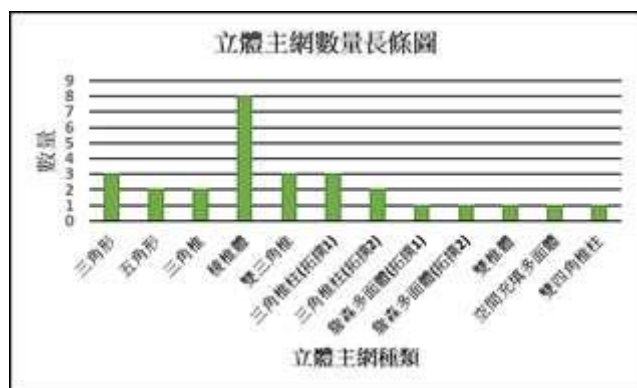


圖 16、立體主網數量長條圖

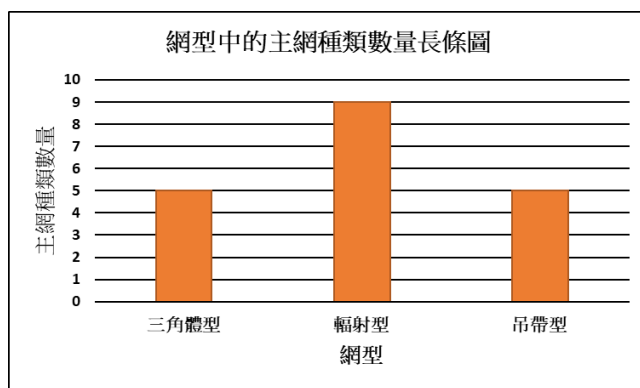


圖 17、網型中的主網種類數量長條圖

如圖 16 所示，12 種立體拓撲形狀中，稜椎體的數量是最多的。推測因立體次級架構為了包覆住面數愈多的主網，需要更多蜘蛛絲，支撐絲數與連結點數就會增加，並使架構更複雜，要耗費更多的養分與體力。因此大姬蛛選擇面數較少，且較穩固的立體形狀主網，其中以稜椎體的數量為最多。如圖 17 所示，輻射型可結出的主網形狀是最多的，因面數愈多的主網，結構總數愈多，而輻射型的結構點數是最多的，所以可結出較多種形狀。可知三種類型中，結出主網拓撲型狀數量不同。如圖 18、19 及 20。

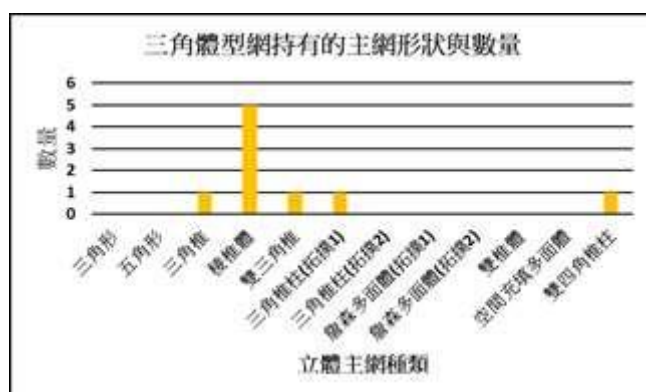


圖 18、三角體型網持有的主網形狀與數量

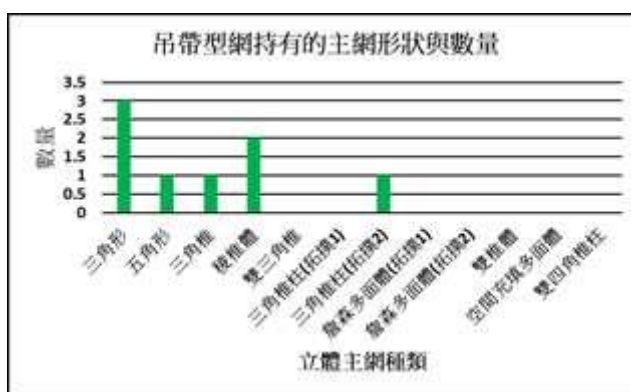


圖 19、吊帶型網持有的主網形狀與數量

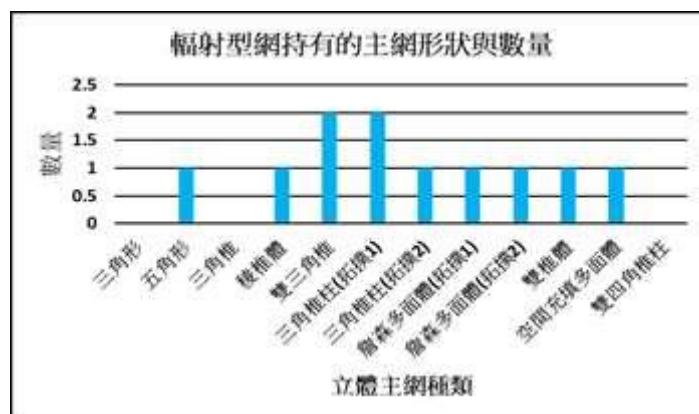


圖 20、輻射型網持有的主網形狀與數量

如圖 18、19 及 20 所示，輻射型網因連結點數多，次級架構較複雜，可結出的主網種類最多，並以立體形狀為主，且結的面數大多高於 5 面(稜椎體)。三角體型與吊帶型雖然皆有 5 種主網外型，但三角體型網以多面的立體主網為主，吊帶型則以平面的主網為主。主網為稜錐體中，三角體型與吊帶型佔大多數，輻射型較少，因連結點總數多，會選擇更加穩固的主網。

四、結網方式與功能

研究中將觀察到已受精及生育卵囊的雌性大姬蛛網，與未受精雌性大姬蛛及雄性大姬蛛網，因主網位置不同與支架的有無，外觀上有明顯的差別。大部分的蜘蛛結網是為了生存以捕捉獵物，此時網的主要功能為獵食。但在護卵期間，大姬蛛為了保護卵囊，會待在卵旁邊不移動，此時網的功能為保護卵囊的保護功能。觀察這兩種不同的生態功能網後，比較網高指數與支架的有無，判斷且定義不同生態功能的結網方式。

$$\text{網高指數} = \frac{\text{主網總高度}}{\text{蛛網總高度}}$$

網高指數：是計算主網總高度位於蛛網總高的比值。可以了解主網在蛛網中的相對位置，並推測其結網的邏輯。

(一) 三角體型

三角體型網的獵食功能網指數較高且有支架，保護功能網指數則較低，不一定有支架。如表 5 及 6。

表 5、三角體型主網與蛛網的網高指數

三角體型				
編號	功能	蛛網總高度 cm	主網總高度 cm	指數
1	保護功能	10	4.25	0.425
2	保護功能	11.34	5	0.441
3	保護功能	15	11.25	0.75
4	保護功能	17	10.5	0.617
5	保護功能	14	9.5	0.678
6	保護功能	15.6	11	0.705
7	保護功能	10	4	0.4
8	獵食功能	16.25	12.75	0.784
9	獵食功能	15	13.12	0.875

表 6、三角體型生態功能網含有支架的百分比

輻射型網			
生態功能	數量	持有支架數量	百分比
保護功能	7	1	14.2%
獵食功能	2	2	100%

三角體型網中，保護功能的網，為了保護主網中的卵囊，會有層層的立體次級架構及牽引絲包覆，使主網位於蛛網的中央，網高指數較低。獵食功能的網，為了捉捕獵物，承受獵物的撞擊力，在網下方會結出支架架構，增加穩固性，並使主網會位於蛛網的上方，網高指數較高。如圖 21、22 及 23。

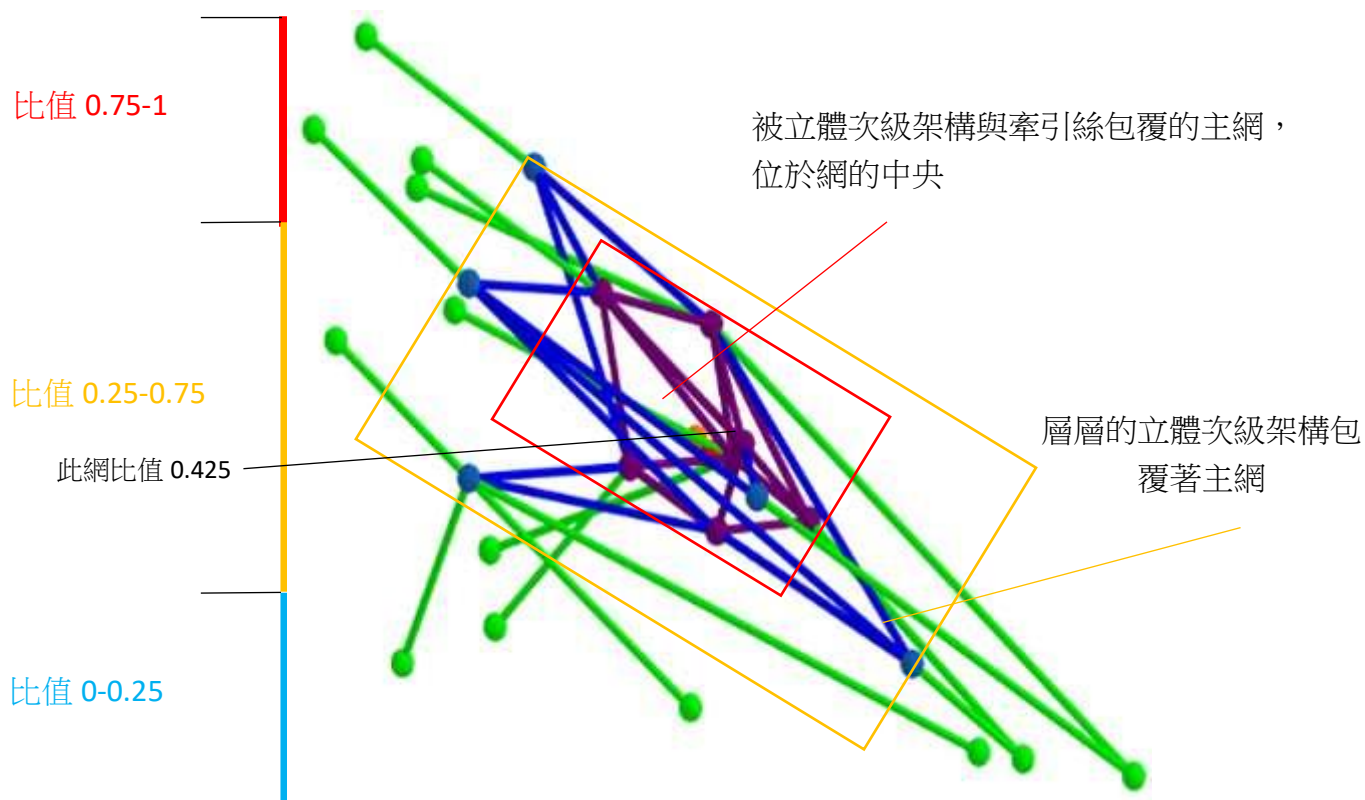


圖 21、無支架的三角體型保護功能網

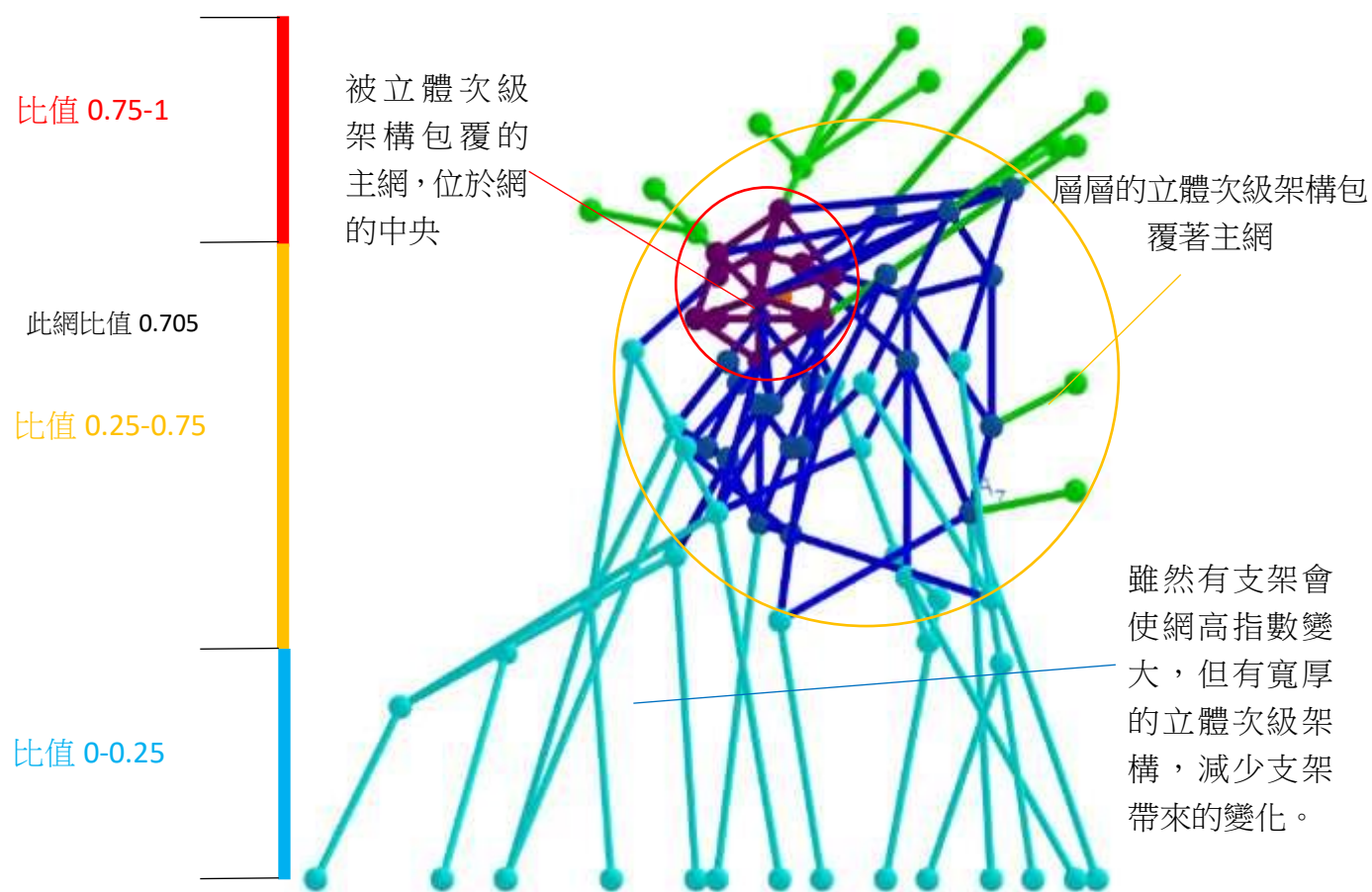


圖 22、有支架的三角體型保護功能網

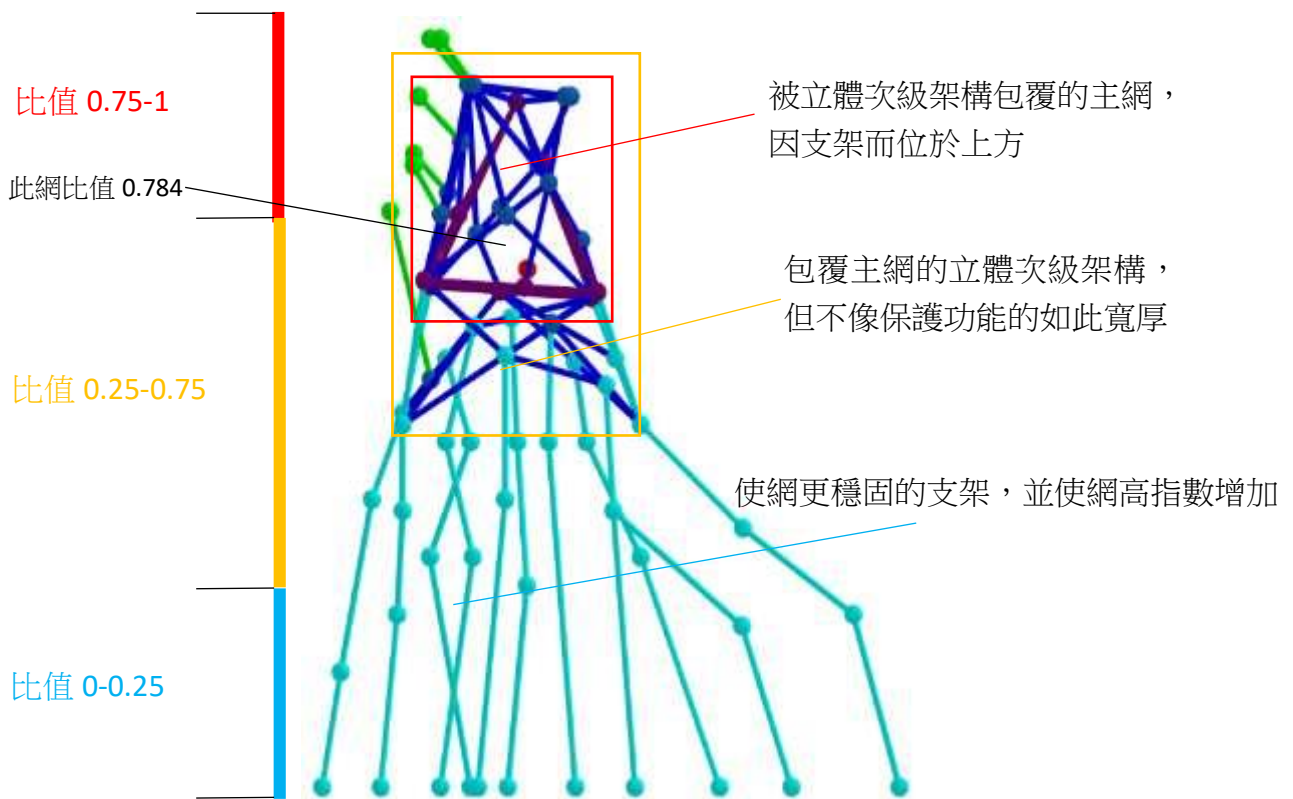


圖 23、三角體型獵食功能網

在三角體型中，觀察到保護功能與獵食功能的外觀差異性最大，所以依這兩個架構上的差異，分出兩種結網的方式：網高指數位於 0.25-0.75 之間，由立體次級架構及牽引絲包覆主網的結網方式，分為**包覆式結法**；網高指數大於 0.75 以上，必有支架支撐，眾多蛛絲向下結網的方式，分為**紮營式結法**。如圖 24。

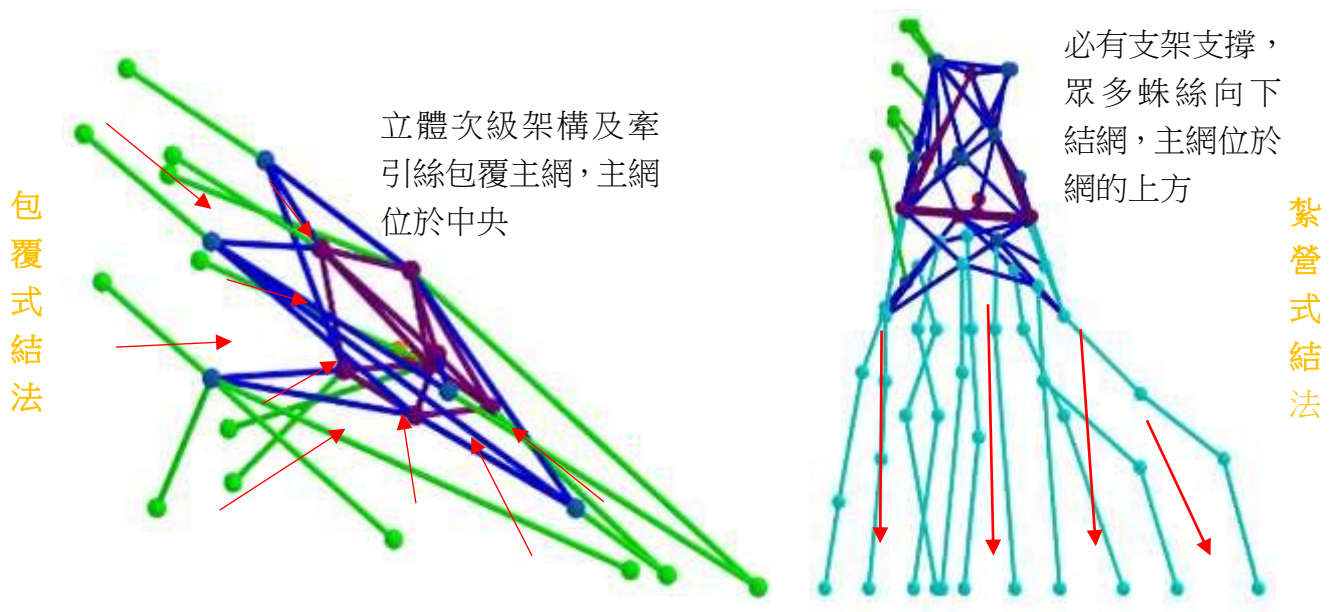


圖 24、三角體型不同的結網法

三角體型網，生態功能與結網方式的分類和架構如圖 25 及 26。

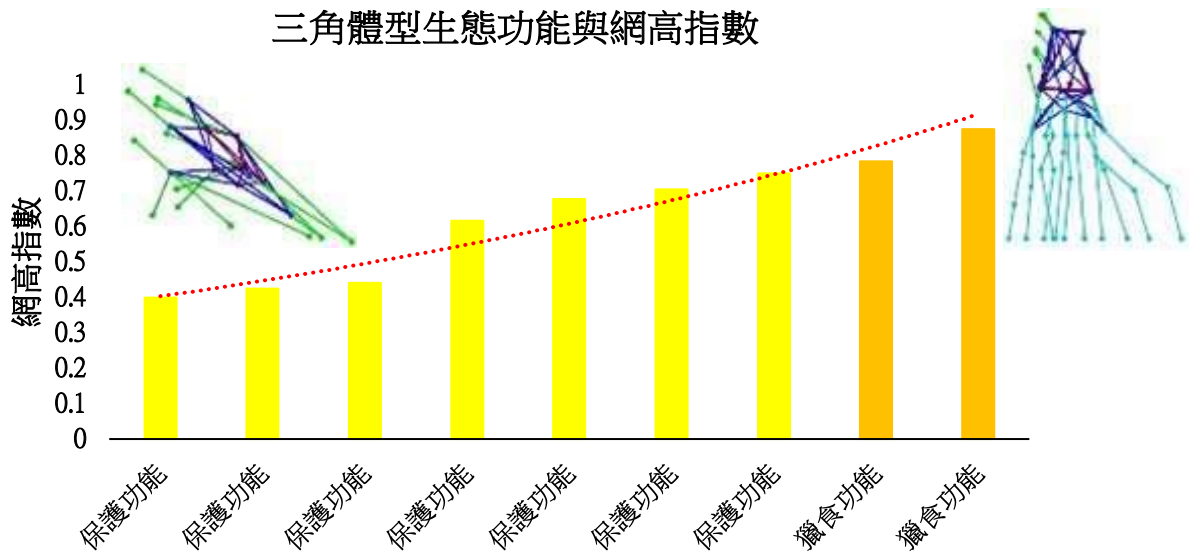


圖 25、三角體型生態功能與網高指數

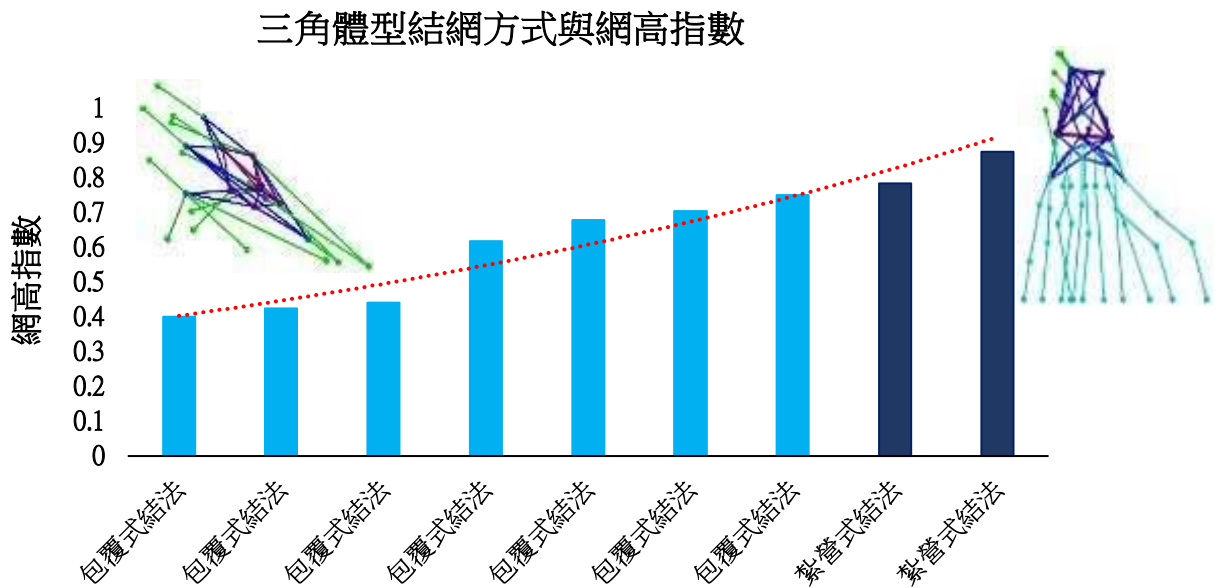
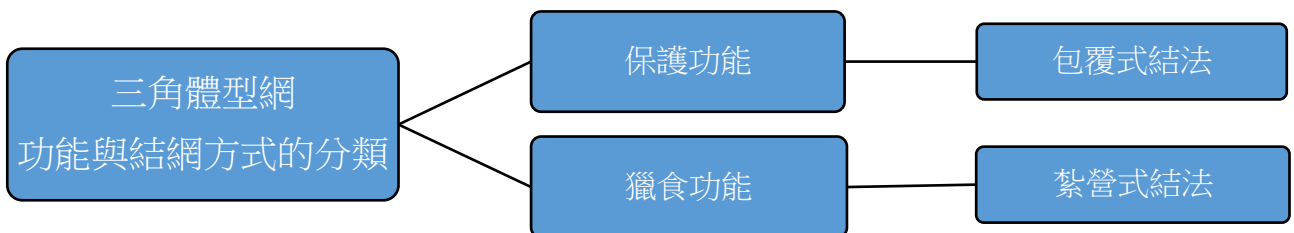


圖 26、三角體型結網功能與網高指數



(二) 吊帶型

吊帶型網的保護功能與獵食功能，網高指數沒有固定，但獵食功能有支架，且網高指數較大，保護功能則不一定。如表 7。

表 7、吊帶型主網與蛛網的網高指數

吊帶型				
編號	功能	蛛網總高度 cm	主網總高度 cm	指數
1	保護功能	14	8	0.571
2	保護功能	14.28	9.107	0.6375
3	保護功能	12	4.25	0.354
4	保護功能	11.11	7.916	0.7125
5	保護功能	16.666	14.75	0.885
6	保護功能	13.333	12.166	0.9125
7	獵食功能	13.333	11.388	0.854
8	獵食功能	10	9.05	0.905

在吊帶型中，保護功能與獵食功能的指數沒有固定，但發現獵食功能網指數皆大於 0.75，且皆有支架，並與指數小於 0.75 的保護功能網，外觀上有明顯的差異，於是將網高指數以 0.75 為界，分開觀察後，發現了兩種不同的結網方式：**包覆式結法**與**倚靠式結法**。如圖 27 及 28。吊帶型沒有立體次級架構，包覆式結法只有支撐絲包覆著主網，主網會於網的中央，且不一定有支架。如表 8。倚靠式結法有支撐絲包覆著主網，且有支架，主網會位於網的上方，而網會緊貼著附著面。

表 8、吊帶型包覆式與倚靠式結法含有支架的百分比

吊帶型網			
結網方式	數量	持有支架數量	百分比
包覆式結法	4	0	0%
倚靠式結法	4	4	100%

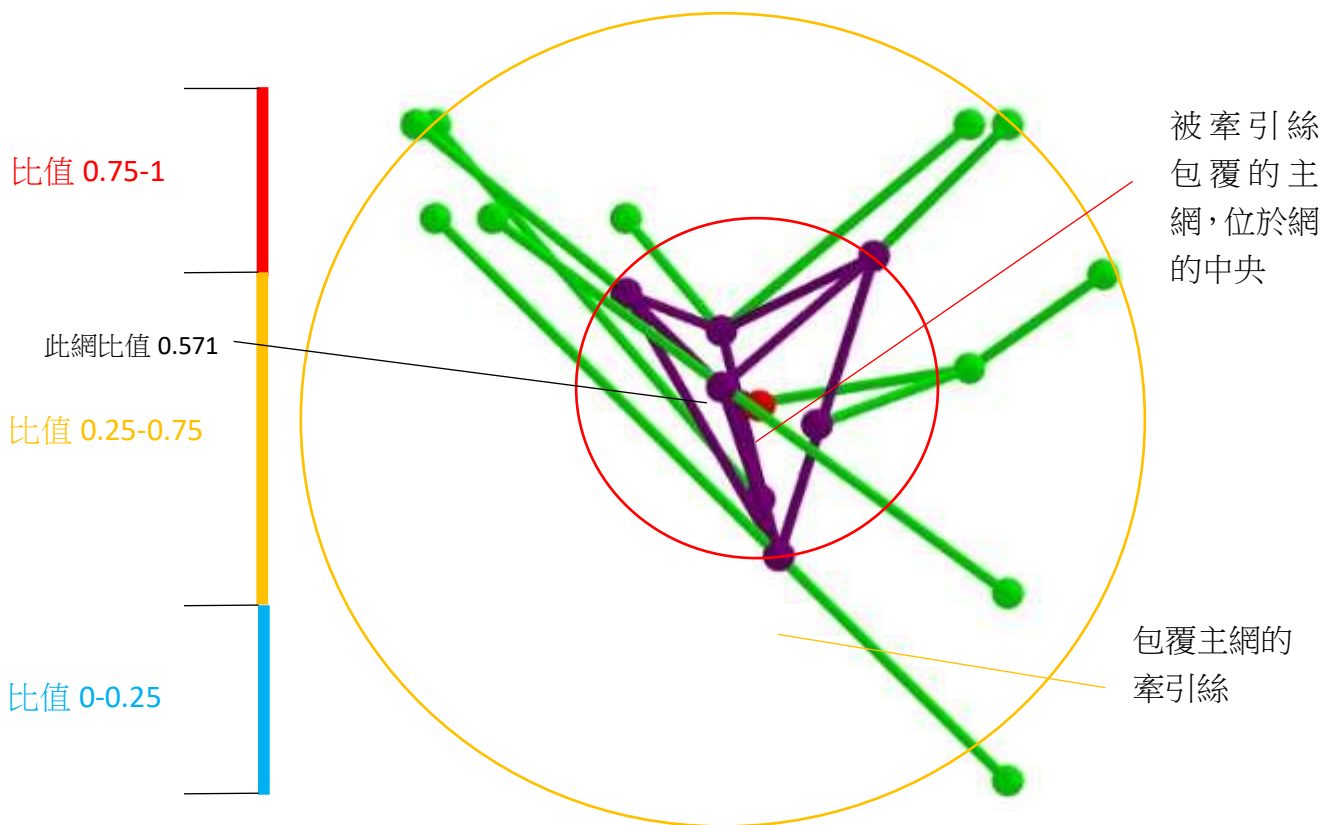


圖 27、吊帶型包裹式結法

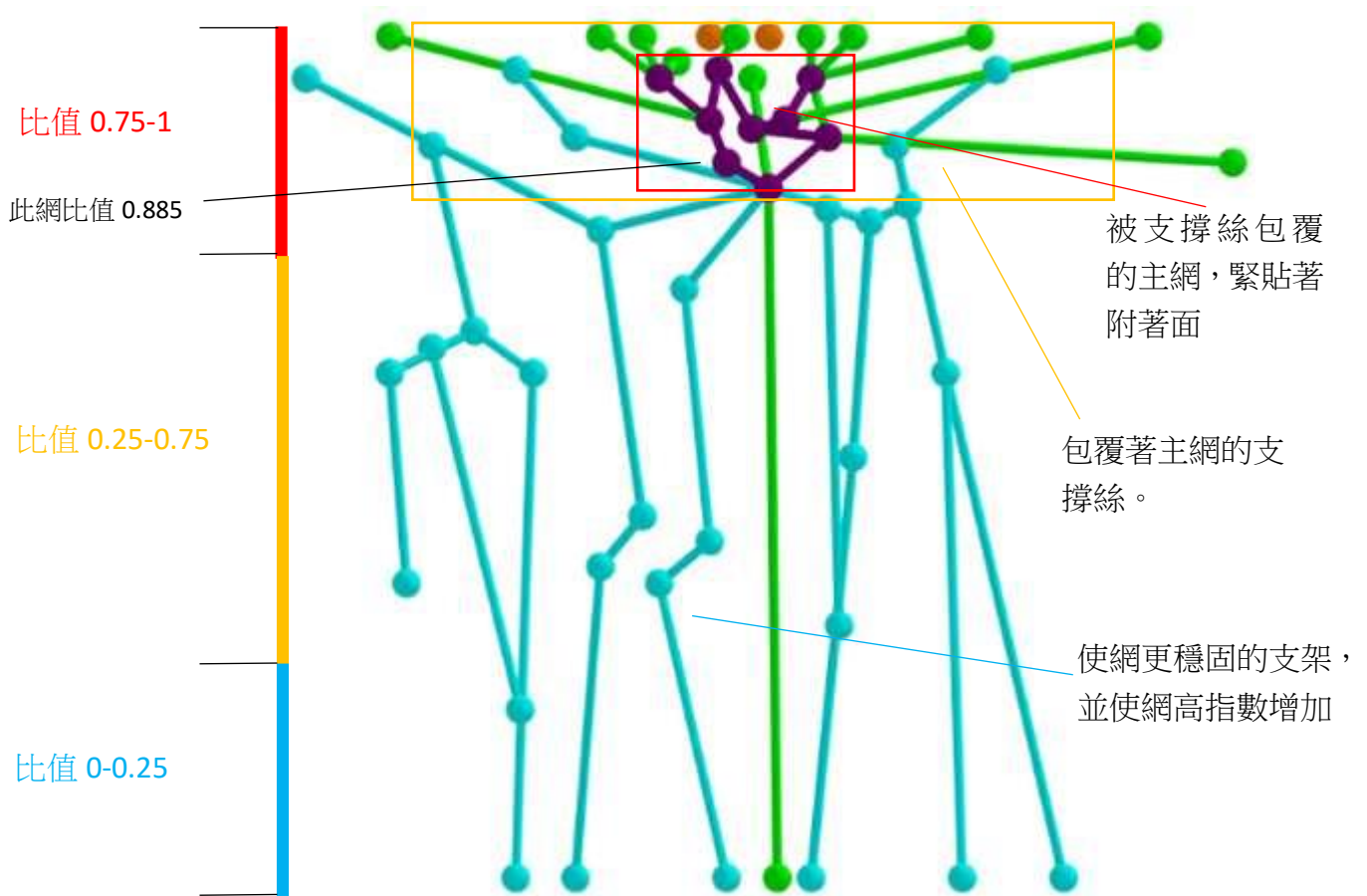
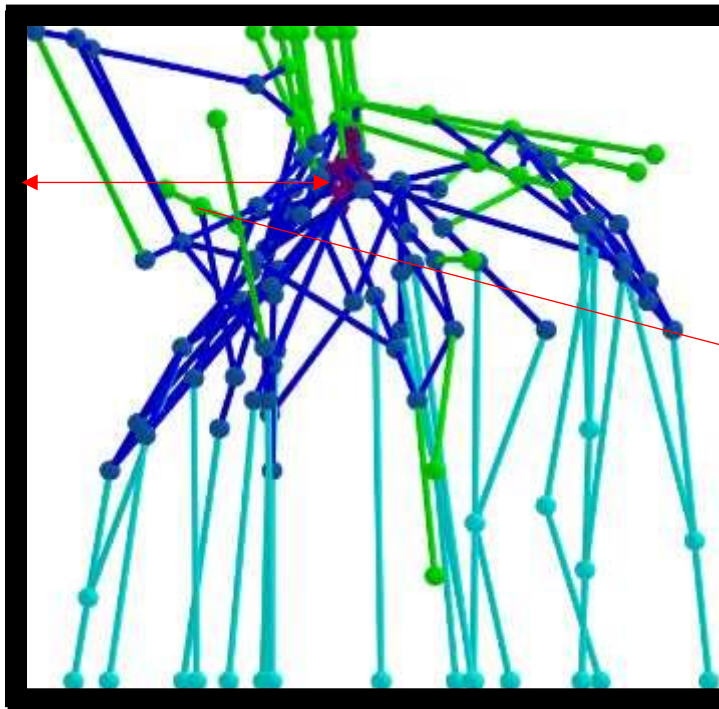


圖 28、吊帶型倚靠式結法

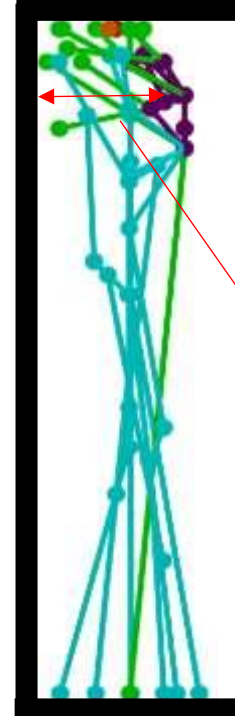
倚靠式與紮營式結法，兩者雖相似，都是主網位於網的上方，網高指數大於 0.75，且有支架，但在外觀及位置上有明顯的差異。倚靠式結法的主網會緊貼著附著面，且主網為平面結構，蜘蛛位於支撐絲包覆主網的立體結構中，而紮營式結法的主網不須倚靠牆面。如圖 29。

輻射型 紮營式結法 側面圖

吊帶型 倚靠式結法 側面圖



主網距離牆面較遠的紮營式結法



主網與外圍包覆的支撐絲緊貼著附著面的倚靠式結法



立體結構的主網
 形狀:雙三角椎
 六面體
 拓撲式: 3,3,3,3,3,3



平面結構的主網
 形狀:三角形
 一面體
 拓撲式: 3

圖 29、倚靠式與紮營式結法差異

研究中發現，吊帶型獵食功能的網，都是倚靠式結法，吊帶型網沒有立體次級架構，架構較不完整，是最不穩固的網，為了承受獵物的衝擊，除了結出支架穩固外，網也緊貼著牆面，使網更加穩固。吊帶型保護功能的網，有倚靠式及包覆式結法兩種結法。為了保護主網中的卵囊，主網被架構包覆，兩種結法的主網皆有被支撐絲包覆，且主網緊貼著附著面增加穩固性，所以對於懷孕及生育的大蜘蛛而言，兩種結法皆可。吊帶型網，生態功能與結網方式的分類和架構如圖 30 及 31。

吊帶型生態功能與網高指數

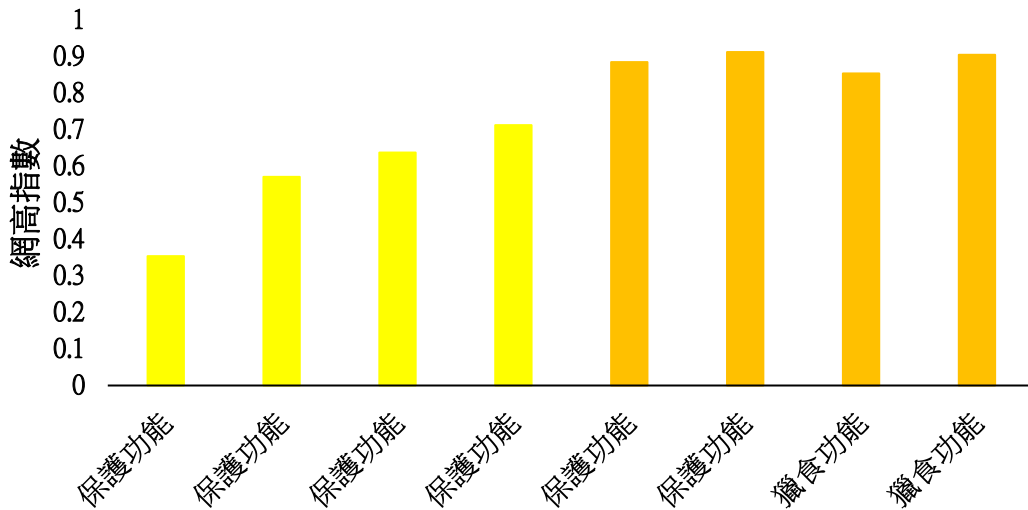


圖 30、吊帶型生態功能與網高指數

吊帶型結網方式與網高指數

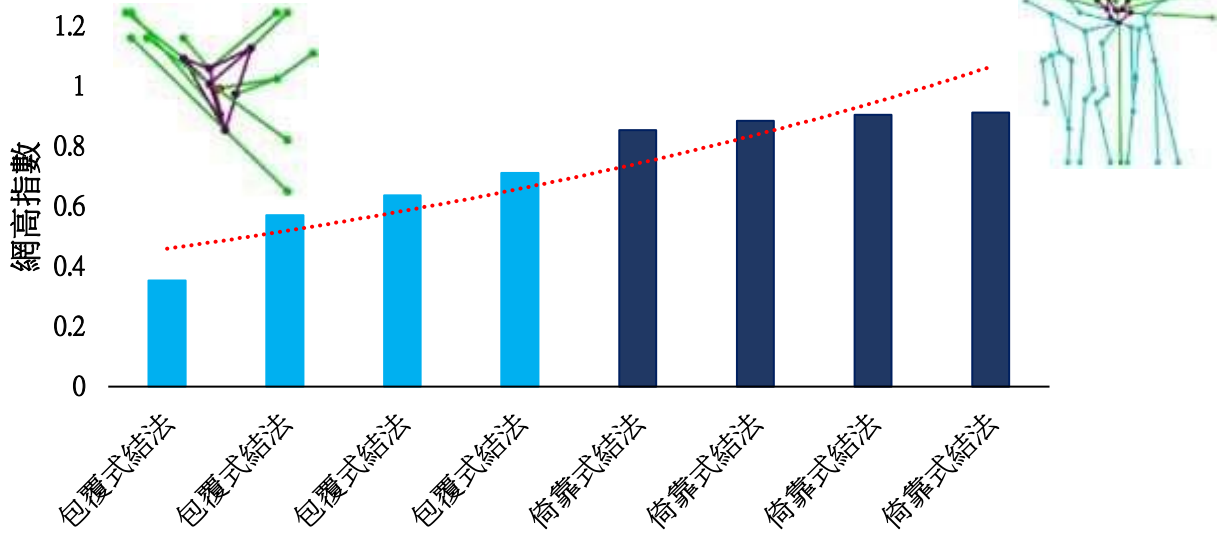
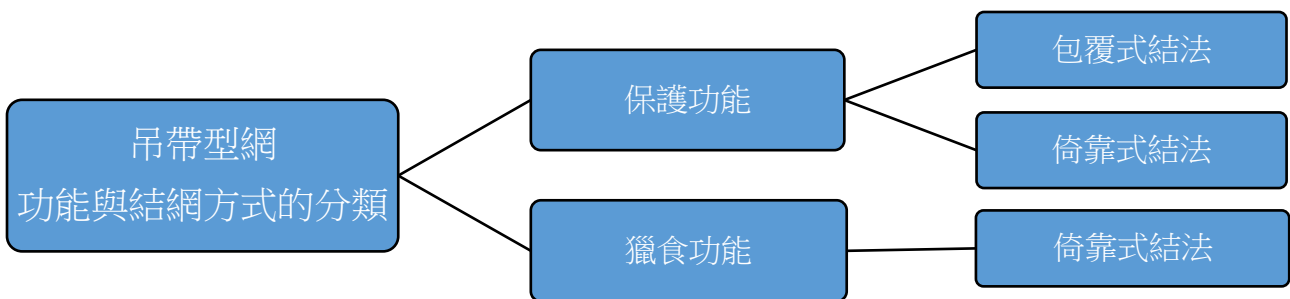


圖 31、吊帶型結網方式與網高指數



如圖 30 及 31 所示，吊帶型生態功能的網高指數，保護及獵食功能的大小沒有固定，而結網方式的網高指數，包覆式結法較小，倚靠式結法則較大。

(三) 輻射型

三角體型網的獵食功能網指數較高且有支架，保護功能網比值則較低，不一定有支架。如表 9 及 10。

表 9、輻射型主網與蛛網的網高指數

輻射型				
編號	功能	蛛網總高度 cm	主網總高度 cm	指數
1	保護功能	12	5	0.416
2	保護功能	19	12	0.631
3	保護功能	11.666	5.416	0.464
4	保護功能	16.666	11.666	0.7
5	保護功能	14.705	8.882	0.604
6	獵食功能	15	12.583	0.838
7	獵食功能	12.333	9.833	0.797
8	獵食功能	14.23	11.846	0.832
9	獵食功能	12	5	0.894
10	保護功能	19	12	0.68
11	保護功能	11.666	5.416	0.68

表 10、輻射型生態功能網含有支架的百分比

輻射型網			
生態功能	數量	持有支架數量	百分比
保護功能	7	4	57.1%
獵食功能	4	4	100%

在輻射型中，與三角體型雷同，保護功能與獵食功能的外觀有明顯的差異，所以依這兩個架構上的差異，分出兩種結網的方式：**包覆式結法**與**紮營式結法**，如圖 32 及 33。包覆式結法有立體次級架構及牽引絲包覆著主網，主網會於網的中央，且不一定有支架。紮營式結法必有支架支撐，有眾多蛛絲向下結網。

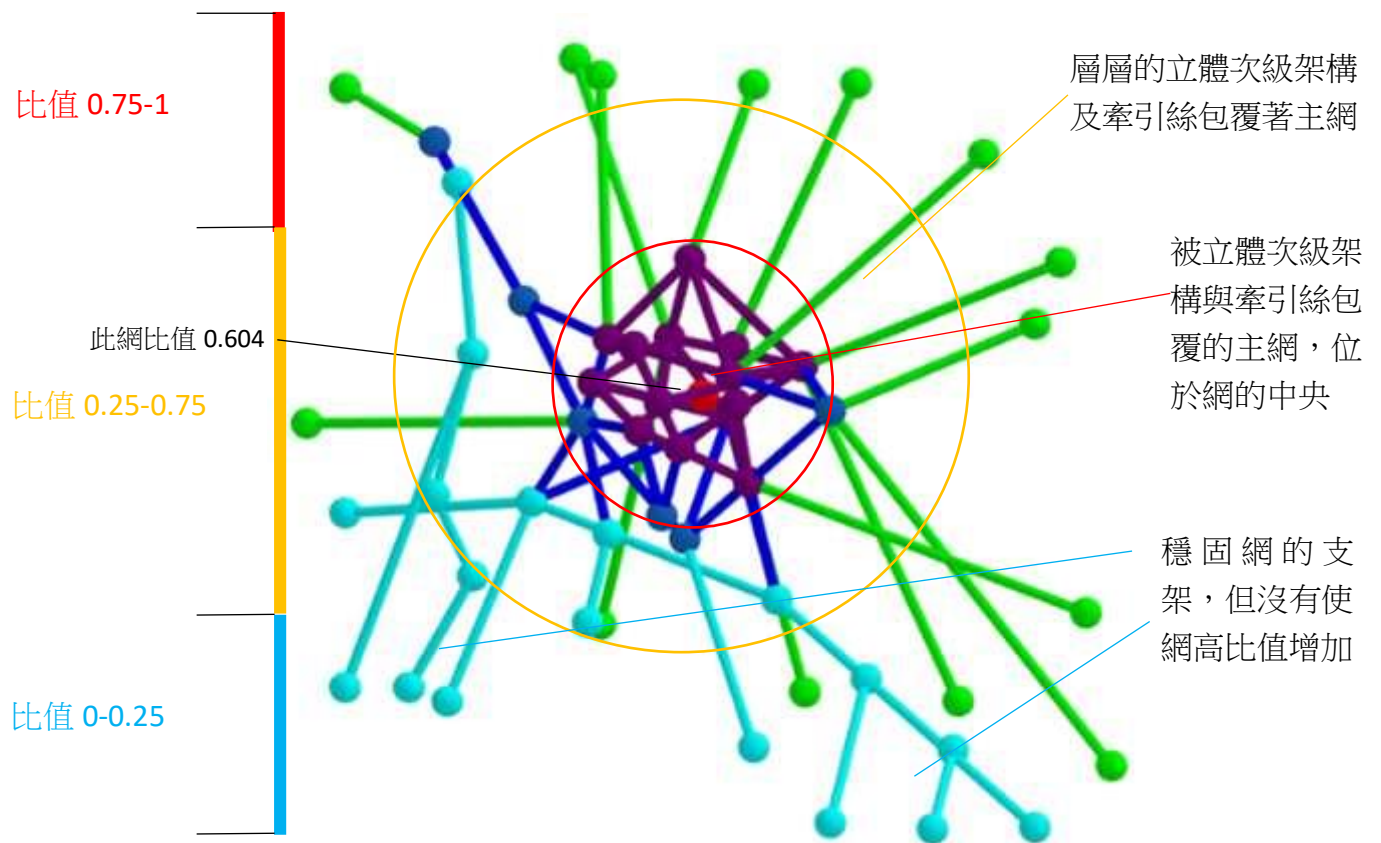


圖 32、輻射型包覆式結法

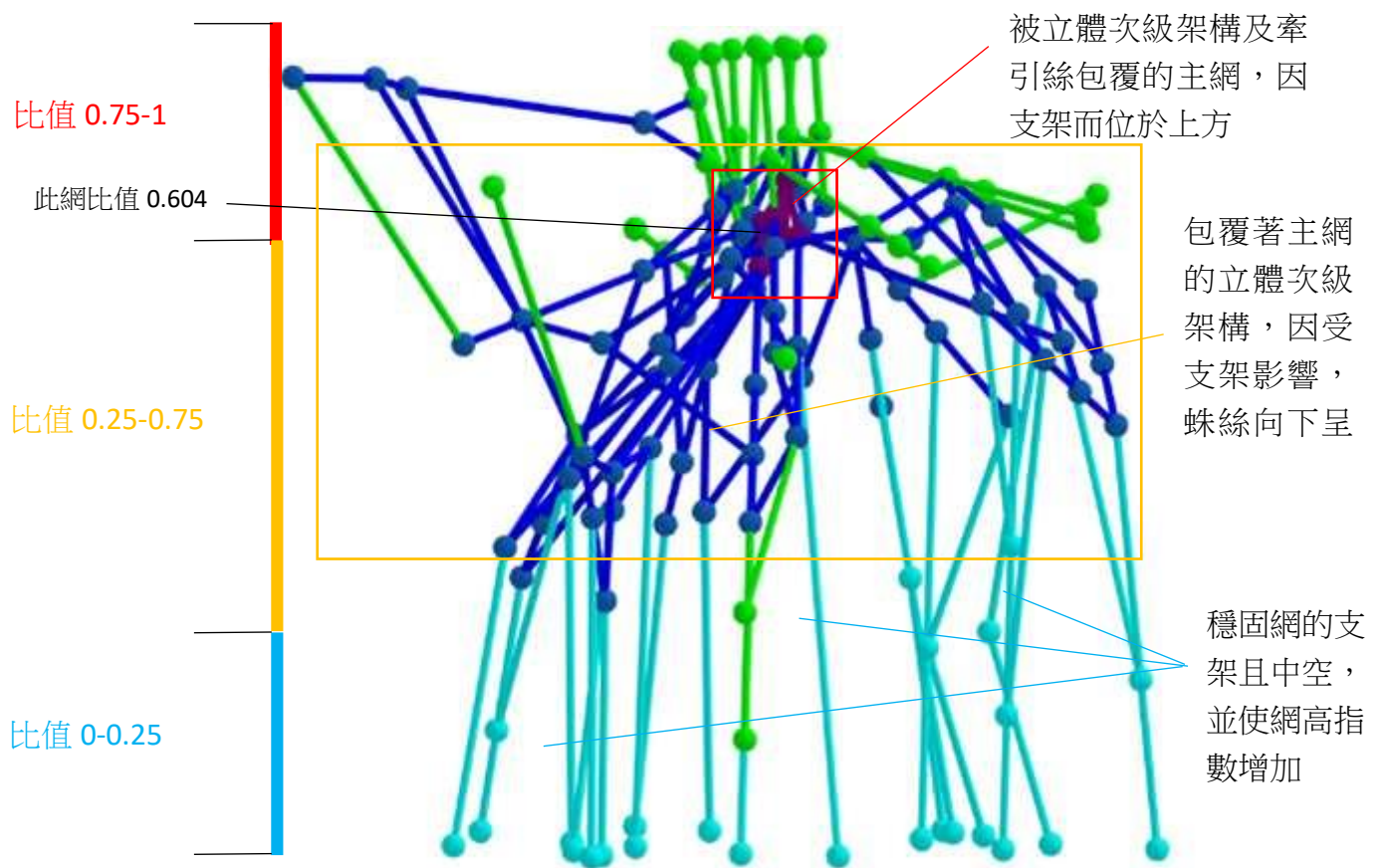


圖 33、輻射型紮營式結法

研究中發現，輻射型獵食功能的網，皆為網高指數大於 0.75 的紮營式結法，為了承受獵物的衝擊，都會結出支架穩固網。輻射型保護功能的網，皆為網高指數小於 0.75 的包覆式結法，主網會被架構包覆，以保護網中的卵囊。如圖 34 及 35。

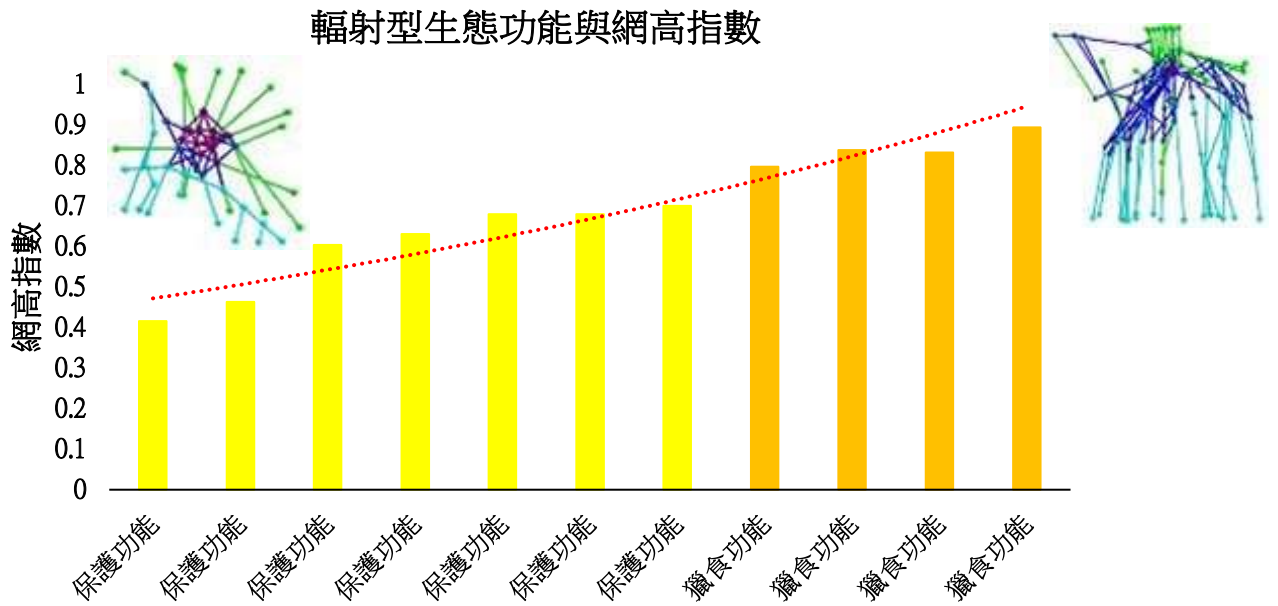


圖 34、輻射型生態功能與網高指數

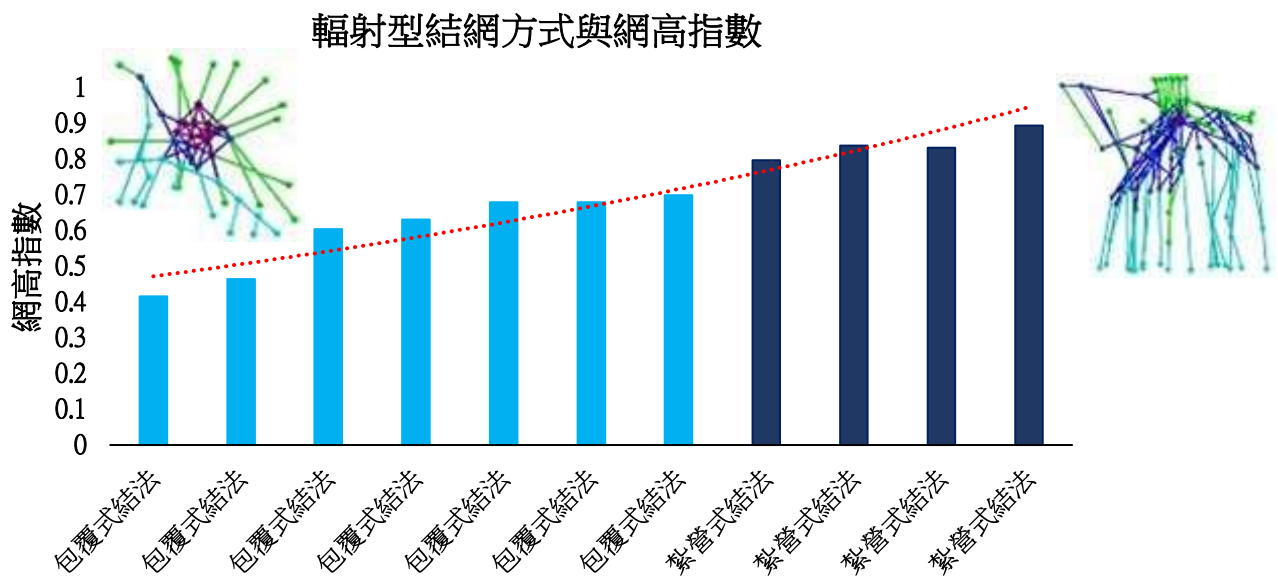
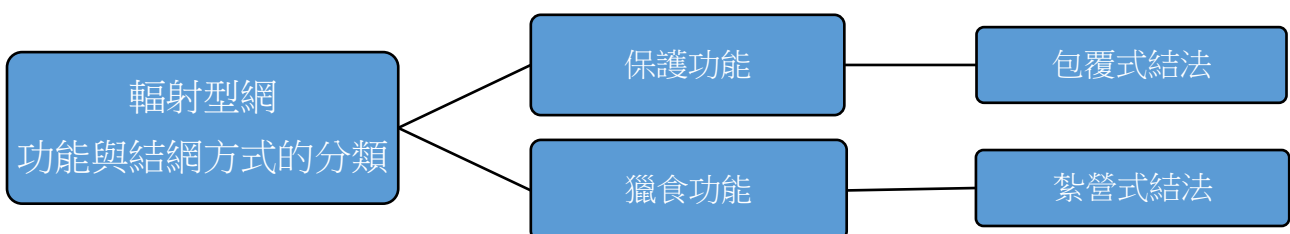


圖 35、輻射型結網方式與網高指數



(四) 類型之間的差異

研究中發現，三角體型與輻射型的獵食功能網，皆為紮營式結法；保護功能網皆為包覆式結法。吊帶型獵食功能網，皆為倚靠式結法，保護功能網則有兩種結網方式：包覆式與倚靠式結法。大部分的保護功能網，結網方式為包覆式結法，主網有立體次級架構或牽引絲包覆。而倚靠式結法，雖然沒有多層的架構包覆，但除了有支架，主網緊貼著附著面，會使網的完整度與保護性增加，所以已受精或生育的雌大姬珠，會結出該環境最安全的網。三種結網方式網高指數分布圖，如圖 36。

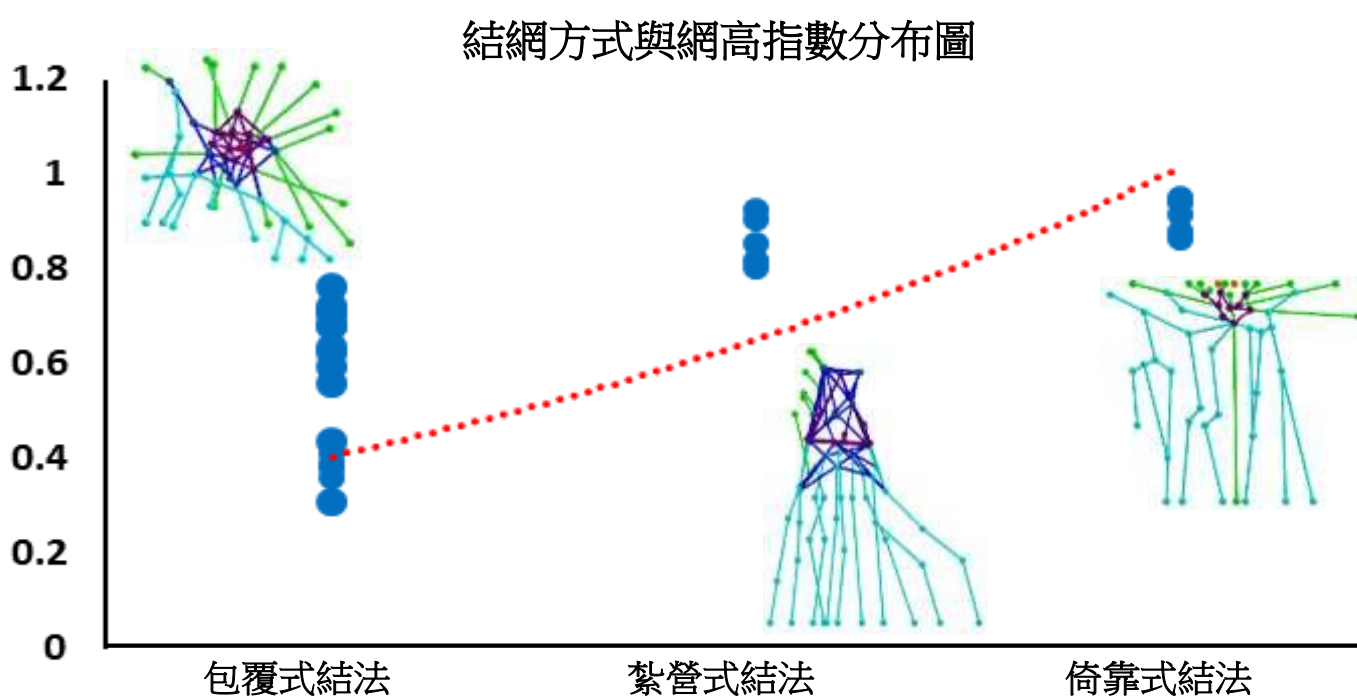


圖 36、結網方式與網高指數關係圖

(五) 結網方式的定義與驗證

經過多次的觀察與計算，依據網高指數、支架的有無及主網的附著方式，定義結網方式。三種類型的結網方式：紮營式、包覆式及倚靠式結法。如圖 37、38 及 39。

1. 繫營式結法定義：網高指數大於 0.75，必有支架，為三角體型與輻射型獵食功能網的結網方式。

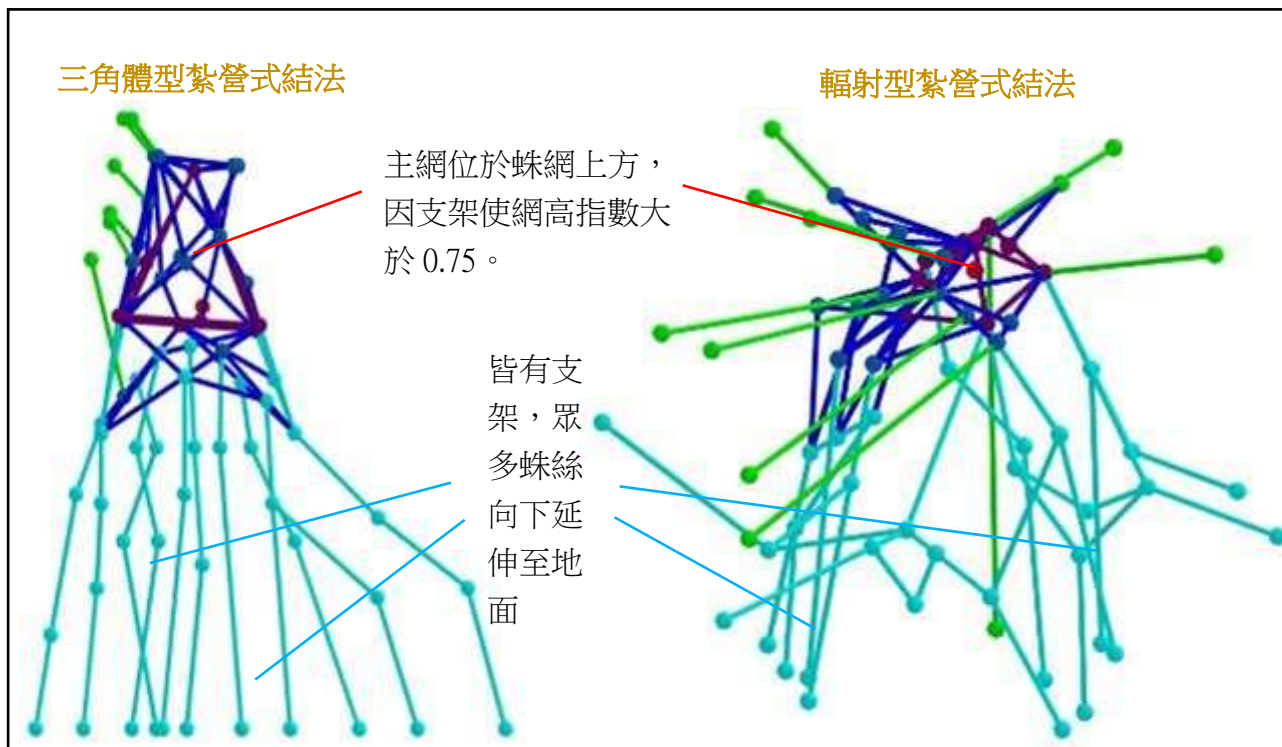


圖 37、繫營式結法

2. 包覆式結法定義：網高指數位於 0.25~0.75 之間，不一定要有支架，為三角體型、吊帶型及輻射型保護功能網的結網方式。

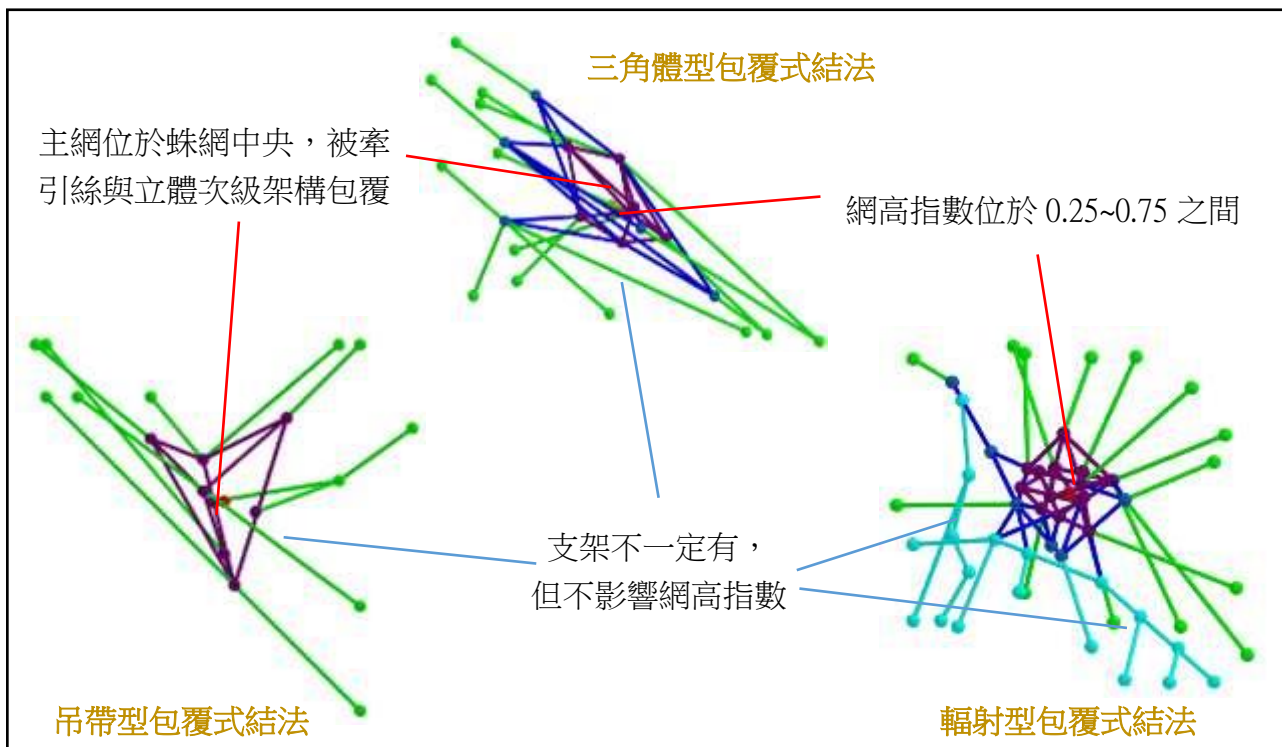


圖 38、包覆式結法

3.倚靠式結法定義：網高指數大於 0.75，必有支架，主網為平面結構，緊貼著附著面，為吊帶型獵食功能與保護功能網的結網方式。

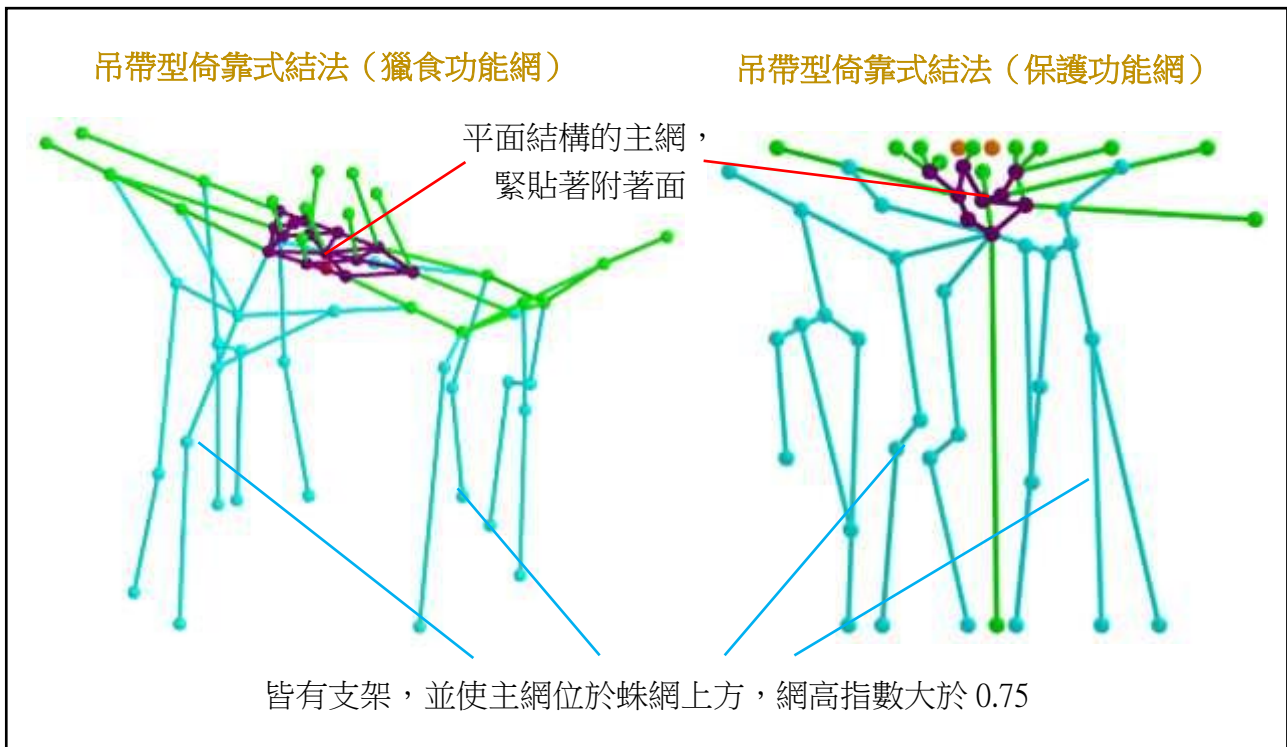


圖 39、倚靠式結法

五、大姬蛛不規則 3D 立體網基本架構變因分析

(一)大姬蛛三種網型 t-test 分析

1.三角體型

將三角體網的包覆式結網方式及紮營式的結網方式，以 *t-test* 分析 9 個變因之間是否有顯著差異。果如表 11。分析後發現，包覆式及紮營式的結網方式，其主網離地高度($t=-2.01$, $p < 0.05$)及網高指數($t=-2.30$, $p < 0.05$)有顯著差異。紮營式的主網離地高度顯著高於包覆式蛛網高度，紮營式的蛛網網高指數顯著大於包覆式。顯示紮營式的主網離地的高度較包覆式高，其主網在整體網中的位置也偏高。

$$\text{主網複雜度指數} = \frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{主網面積}} \quad \text{蛛網複雜度指數} = \frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{最大投影面積}}$$

主網複雜度指數：是主網面積中蛛網總連結點數；蛛網複雜度指數：是蛛網總面積中蛛網總連結點數。

表 11、三角體型大姬蛛蛛網包覆及紮營式的結網方式 9 個變因比較(*t-test*)

變因	t 值	P 值	平均值	
			包覆式	紮營式
最大投影面積(cm ²)	-0.45	0.33	139.25	131.36
主網面積(cm ²)	-0.54	0.30	34.65	39.52
牽引絲+支架絲總數	0.08	0.47	15.86	15.50
蛛網中總連結數	-0.01	0.49	37.86	38.00
蛛網總高度(cm)	-1.11	0.15	13.27	15.63
主網離地高度(cm)	-2.01	0.04	7.93	12.94
網高指數 = $\frac{\text{主網總高度}}{\text{蛛網總高度}}$	-2.30	0.03	0.57	0.83
主網複雜度指數 = $\frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{主網面積}}$	0.48	0.32	1.41	0.95
蛛網複雜度指數 = $\frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{最大投影面積}}$	-0.04	0.48	0.29	0.29

2.吊帶型

將吊帶型的包覆式結網方式及倚靠式的結網方式，以 *t-test* 分析 9 個變因之間是否有顯著差異。結果如表 12。分析後發現，包覆式及倚靠式的結網方式，其主網面積($t=3.07, p<0.05$)、牽引絲+支架絲總數($t=-2.65, p<0.05$)、主網離地高度($t=-2.85, p<0.05$)、**網高指數**($t=-4.09, p<0.05$)、**主網複雜度指數**($t=-3.01, p<0.05$)有顯著差異。倚靠式的主網面積顯著小於包覆式，倚靠式的牽引絲+支架絲總數顯著大於包覆式，倚靠式的主網離地高度顯著高於包覆式，倚靠式的蛛網**網高指數**顯著大於包覆式，倚靠式的蛛網**主網複雜度指數**顯著大於包覆式。顯示倚靠式的牽引絲+支架絲總數、主網離地高度、**網高指數**、**主網複雜度指數**，均大於包覆式。包覆式結網方式，只有主網面積大於倚靠式。

表 12、吊帶型大姬蛛蛛網包覆及倚靠式的結網方式 9 個變因比較(*t-test*)

變因	t 值	P 值	平均值	
			包覆式	倚靠式
最大投影面積(cm ²)	-1.56	0.11	96.53	151.03
主網面積(cm ²)	3.07	0.01	36.95	12.86
牽引絲+支架絲總數	-2.65	0.02	9.50	16.75
蛛網中總連結數	-0.94	0.19	10.75	13.50
蛛網總高度(cm)	-0.31	0.38	12.84	13.33
主網離地高度(cm)	-2.85	0.01	7.32	11.84
網高指數 = $\frac{\text{主網總高度}}{\text{蛛網總高度}}$	-4.09	0.01	0.57	0.89
主網複雜度指數 = $\frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{主網面積}}$	-3.01	0.03	0.31	1.13
蛛網複雜度指數 = $\frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{最大投影面積}}$	1.37	0.11	0.11	0.09

3.輻射型

將輻射型網的包覆式結網方式及紮營式的結網方式，以 *t-test* 分析 9 個變因之間是否有顯著差異。結果如表 13。分析後發現，包覆式及紮營式的結網方式，其主網面積($t=4.16$ ， $p<0.05$)、主網複雜度指數($t=-4.64$ ， $p<0.05$)及網高指數($t=-4.11$ ， $p<0.05$)有顯著差異。包覆式的蛛網主網面積顯著大於紮營式蛛網，紮營式的主網複雜度指數顯著大於包覆式蛛網，紮營式的蛛網網高指數顯著大於包覆式。顯示包覆式主網的面積較大，而紮營式其主網在整體網中的位置也偏高。

表 13、輻射型大姬蛛蛛網包覆及紮營式的結網方式 9 個變因比較(*t-test*)

變因	t 值	P 值	平均值	
			包覆式	紮營式
最大投影面積(cm ²)	-0.48	0.32	162.65	172.71
主網面積(cm ²)	4.16	<0.01	39.35	13.03
牽引絲+支架絲總數	-1.20	0.13	19.57	27.25
蛛網中總連結數	-0.50	0.32	57.43	66.50
蛛網總高度(cm)	0.82	0.21	14.15	12.77
主網離地高度(cm)	-1.38	0.10	8.57	10.69
<u>網高指數</u> = $\frac{\text{主網總高度}}{\text{蛛網總高度}}$	-4.11	<0.01	0.59	0.84
<u>主網複雜度指數</u> = $\frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{主網面積}}$	-4.64	<0.01	1.65	5.21
<u>蛛網複雜度指數</u> = $\frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{最大投影面積}}$	-0.58	0.29	0.33	0.39

(二)大姬蛛三個類型網保護功能的變因 One-way ANOVA 分析

依據研究中大姬蛛的網型分類方法，將大姬蛛的蛛網外型區分成三大類，分別為三角體型、吊帶型以及輻射型。將 9 個變因使用單因子變異數分析(One-way ANOVA)不同蛛網的各項變因是否有顯著差異。分析結果如表 14，有顯著差異的變因為**蛛網複雜度指數**($F=3.70$ ， $p<0.05$)。三角體型及輻射型無顯著差異，吊帶型的**蛛網複雜度指數**是最小的，與另外兩種網型有顯著差異。顯示以蛛網的複雜度來看，三角體及輻射型的複雜度高，吊帶型的複雜度低。除蛛網複雜度指數之外，三種不同類型的蛛網其蛛網的連接點數量，吊帶型蛛網中連接點數量小於其他兩種類型的蛛網，顯示吊帶型蛛網結構最為簡單。

表 14、大姬蛛三種類型蛛網保護功能形式 9 個變因比較(One-way ANOVA)

變因	F 值	P 值	平均值		
			三角體型	吊帶型	輻射型
最大投影面積(cm ²)	2.83	0.09	139.25	96.53	162.65
主網面積(cm ²)	0.19	0.83	34.66	36.95	39.35
牽引絲+支架絲總數	2.75	0.10	15.86	9.5	19.57
蛛網中總連結數	3.19	0.07	37.86	10.75	57.43
蛛網總高度(cm)	0.37	0.70	13.28	12.85	14.15
主網離地高度(cm)	0.25	0.78	7.93	7.32	8.57
$\text{網高指數} = \frac{\text{主網總高度}}{\text{蛛網總高度}}$	0.07	0.93	0.57	0.57	0.60
$\text{主網複雜度指數} = \frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{主網面積}}$	1.95	0.18	1.41	0.31	1.65
$\text{蛛網複雜度指數} = \frac{\text{蛛網連結點總數}}{\text{最大投影面積}}$	3.70	0.049	0.29	0.11	0.33

六、大姬蛛網生態功能轉換過程

不管是雌性或雄性的大姬蛛，一開始結網的目的都是為了獵食，到了雌蛛已受精時，蛛網的功用才會改為保護功能。兩種網之間的結網方式差異性很大，如輻射型網中，保護功能的網是包覆式結法；獵食功能網則是紮營式結法。研究中，發現到一個 8 月~11 月的雌性大姬蛛，配合網高指數，在生態功能網上的變化。

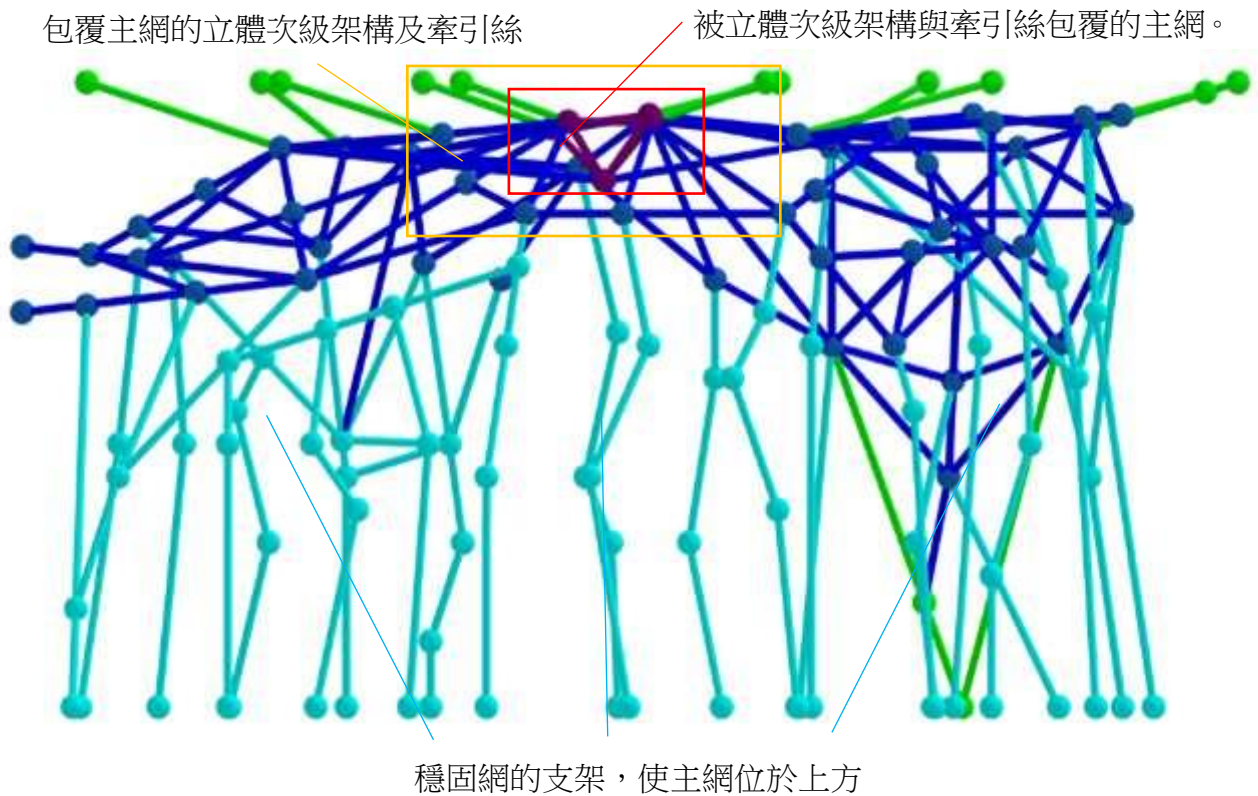


圖 40、生態功能轉換過程 第一階段 8 月~9 月

依研究中的定義，圖 40 第一階段網的數據，為輻射型獵食功能網，紮營式結法。此階段的雌蛛未受精，網以獵食為主。數據為表 15。

表 15、第一階段相關數據

第一階段 8 月~9 月	
支撐絲總數	37
連結點總數	81
網高指數	0.894

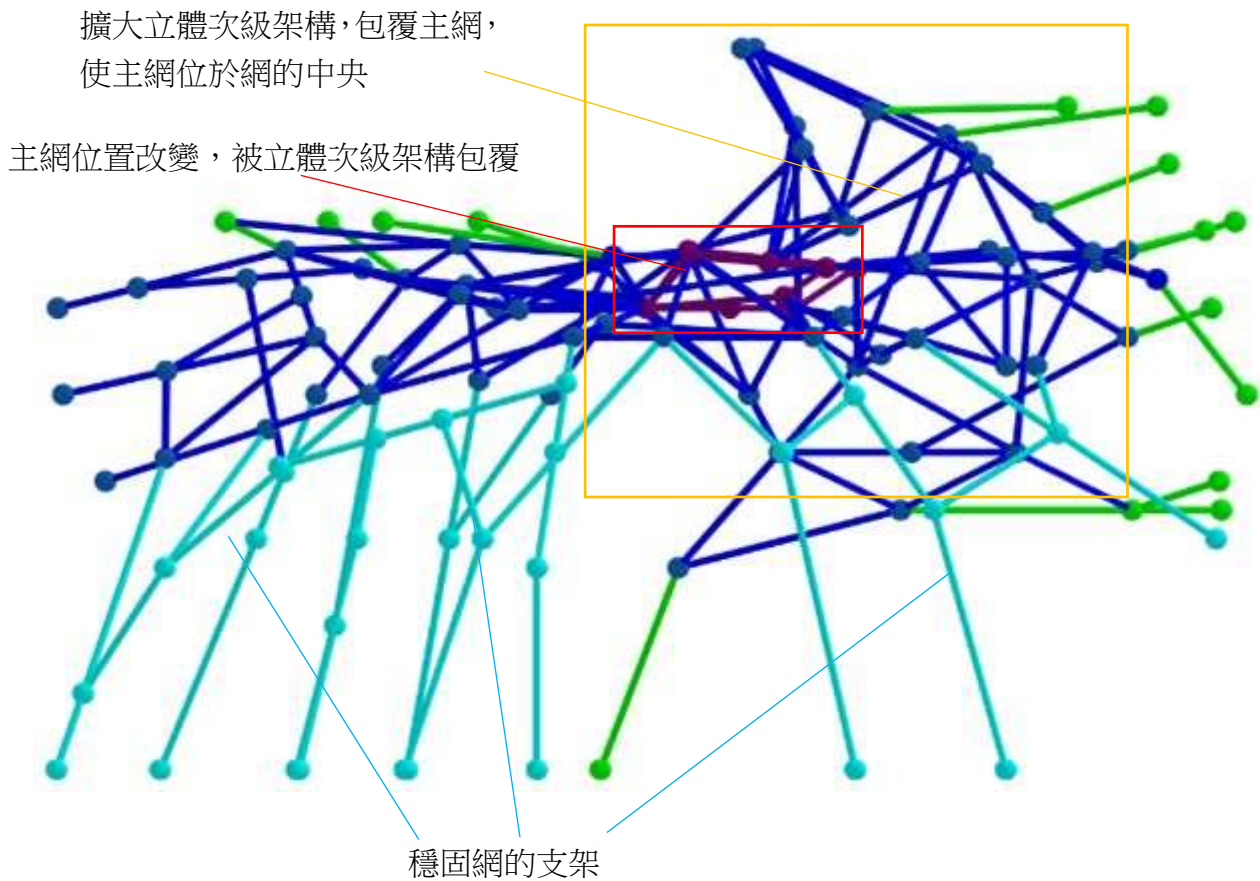


圖 41、生態功能轉換過程 第二階段 9月~10月

依研究中的定義，圖 12 第二階段網的數據，為輻射型保護功能網，包覆式結法。此階段的雌蛛已懷孕，網以保護為主。數據為下表 14。比對第一與第二階段的網，發現因雌蛛懷孕，改變了主網的位置且擴大了立體次級架構，使主網位於網的中央，網高比值降低，呈現包覆式結法的網，且總連結數增加。此時的大姬蛛花費養分擴大立體次級架構，使網更複雜，增加網的保護能力，但不修補受到破壞的支架。

表 16、第二階段相關數據

第二階段 9月~10月	
支撐絲總數	24
連結點總數	111
網高指數	0.68

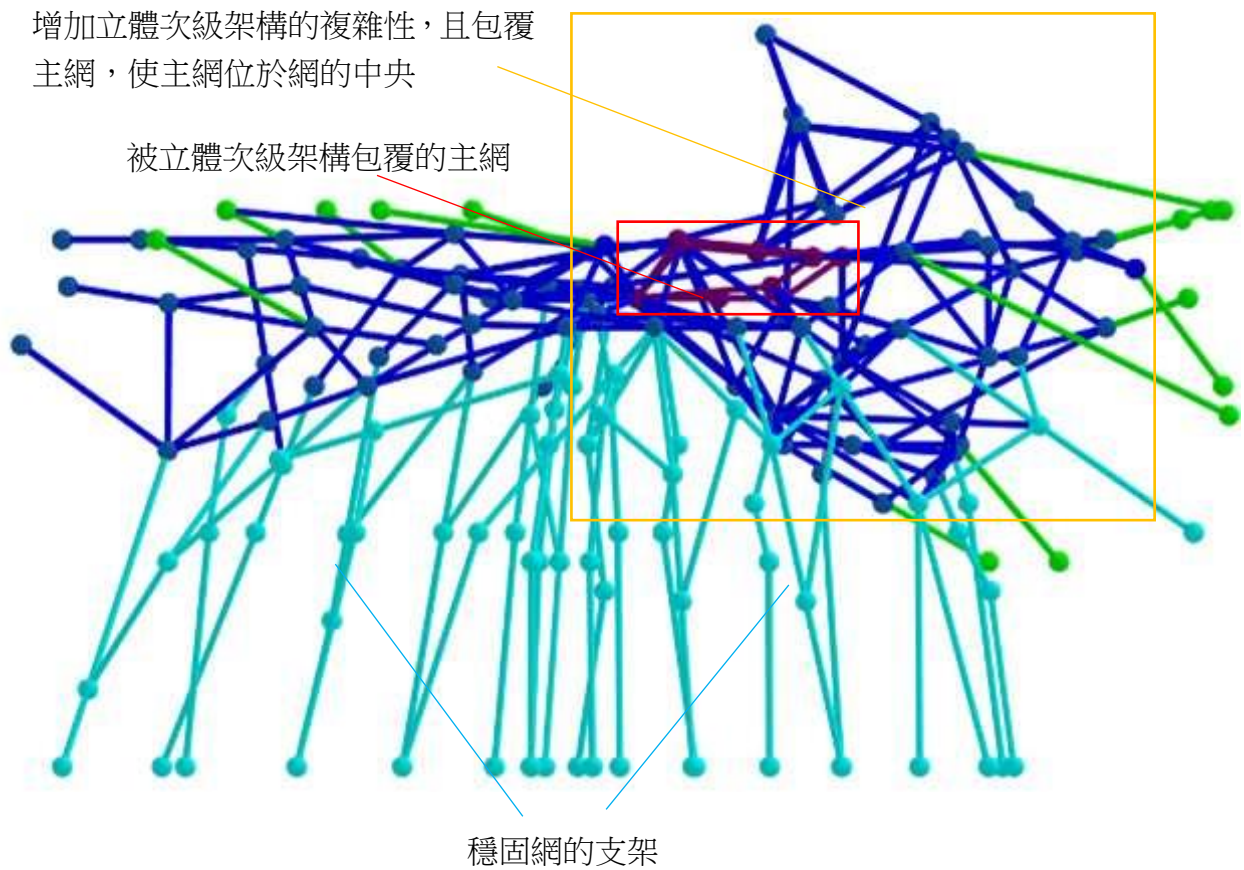


圖 42、生態功能轉換過程 第三階段 10 月~11 月

依研究中的定義，圖 42 第三階段網的數據，為輻射型保護功能網，包覆式結法。此階段的雌蛛已生育卵囊，網以保護為主。數據為下表 15。因生育卵囊，所增加立體次級架構的複雜性，與支架的絲數量，使網更穩固與安全，為所有階段中，總連結數及牽引絲數量最多的。

表 17、第三階段相關數據

第二階段 10 月~11 月	
支撐絲總數	36
連結點總數	132
網高指數	0.68

研究中發現，大姬蛛會因懷孕及生育卵囊，而改變網的功能與結網方式。在吊帶與輻射型中，保護功能網有兩個結網方式，結網方式是否要改變，可能因大姬蛛會考量此網的穩固與安全性而決定，所以保護功能網是由獵食功能網轉變或是重新再結網。

七、改變卵囊位置已觀察

研究中，假說卵囊位置的移動會影響蜘蛛結網的型態。從研究中分析後發現，包覆式結法的保護功能網，網高指數位於 0.25~0.75 之間，蜘蛛與卵囊在位於蛛網中央的主網裡，而此網是從獵食功能網轉變而來的。因此假說，若卵囊位置大幅的移動，大姬蛛會到卵囊旁，重新吐絲，改變網的結構。為了驗證假說，實驗中將卵囊移動到主網外，並放置在大於網高指數 0.75 的蛛網位置上，觀察蜘蛛的行為。如圖 43。

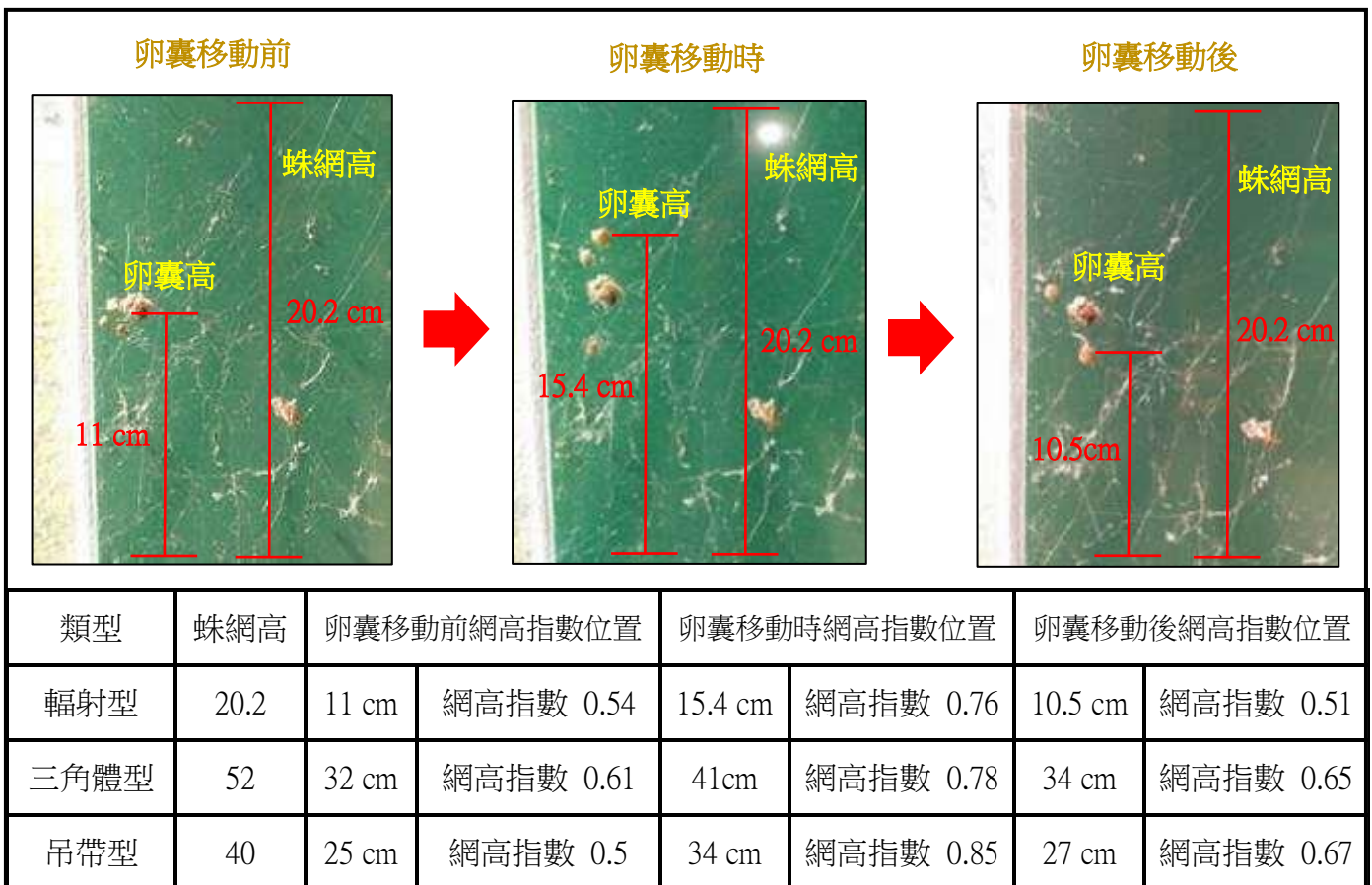


圖 43、卵囊位置的移動（照片中為輻射型網）

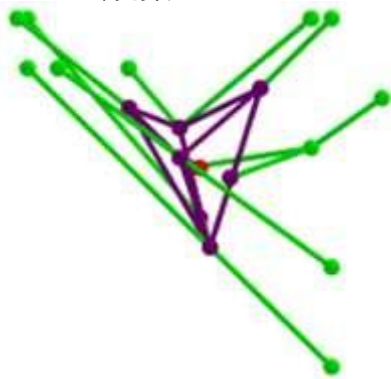
如圖 43 所示，卵囊被移置到網高指數大於 0.75 的位置時，大姬蛛會將卵囊移動回網高指數在 0.25~0.75 之間的主網中，而不是假說中的到卵囊旁，重新結網，改變網的結構。且三種類型的網，結果一致。

八、三大網型的出現機率

研究中所觀察的大姬蛛，都是位於人工的建築環境中。在牆角的地方，會因夾角明顯與附著面少，出現三角體型網的機率較高；而在樓梯間，因附著面多，出現輻射型網的機率較高。在人工環境下無法計算類型中的出現機率，所以做了模擬自然環境，使三種網型都可結出的實驗箱，放入 10 隻大姬蛛，計算不同類型的出現機率。結果如圖 44。

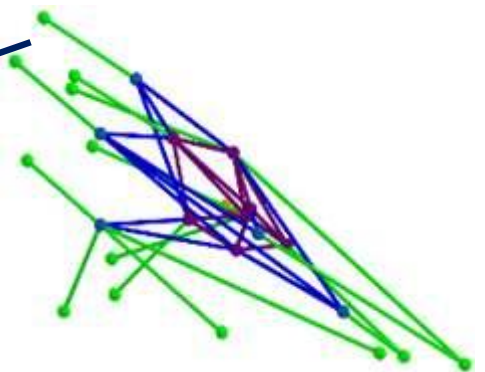
類型：吊帶型

出現數量：2



類型：三角體型

出現數量：1



類型：輻射型

出現數量：7

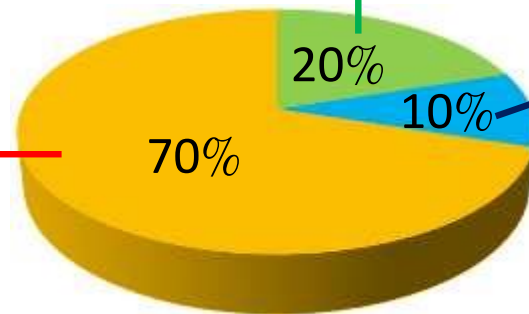
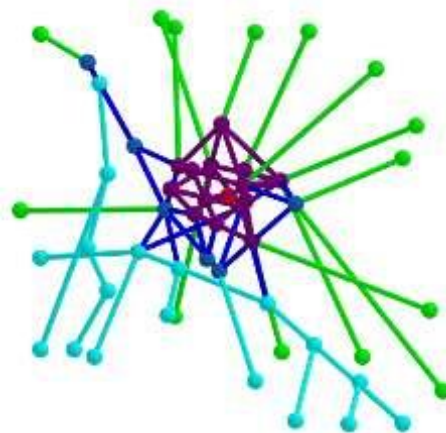


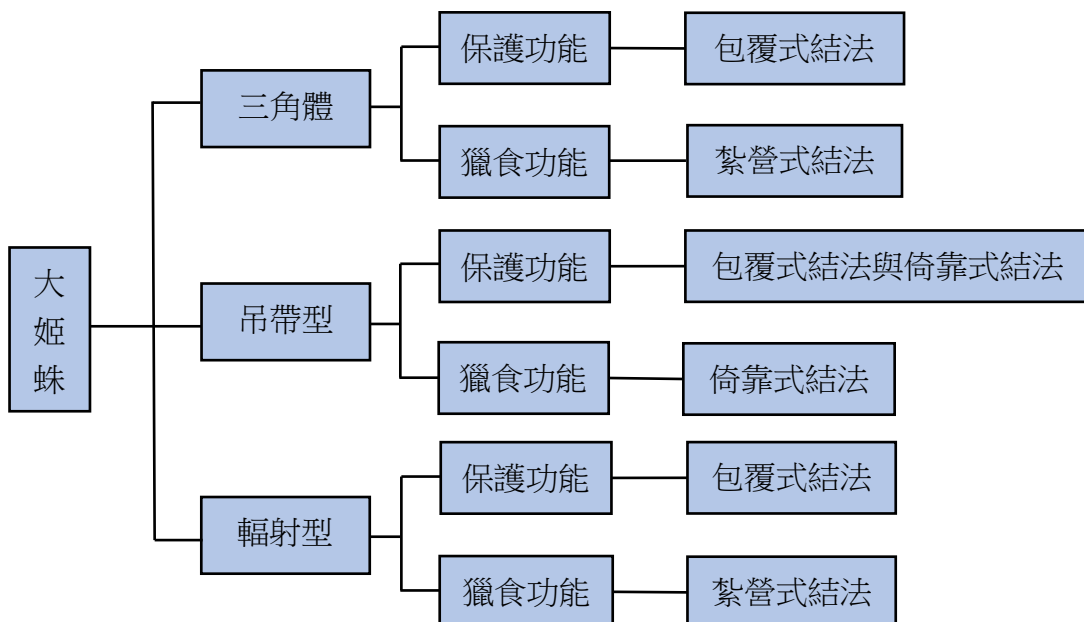
圖 44、類型的出現機率

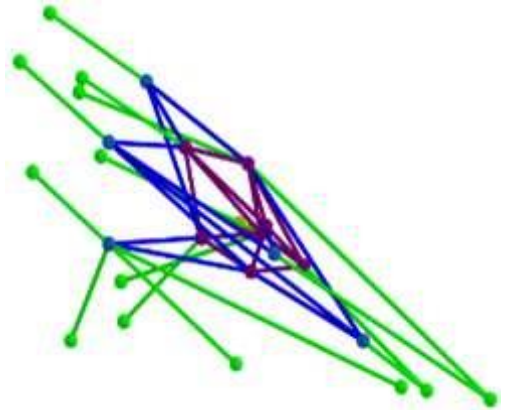
如圖 44 所示，出現機率：輻射型>吊帶型>三角體型，在三種類型都能結出來的實驗箱中，輻射型為最穩固的網，所以出現率最大；大姬蛛剛放入實驗箱中，結出環境要求最少的吊帶型網，之後結網修飾成三角體型或輻射型網。

肆、結論與應用

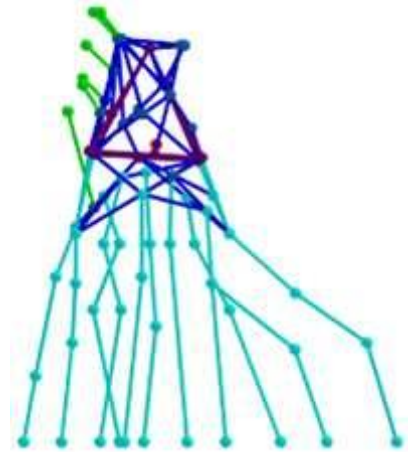
一、結論

- (一) 大姬蛛網的架構可分為：主網、立體次級架構、牽引絲及支架。
- (二) 大姬蛛結網過程：牽引絲 → 主網 → 立體次級架構 → 支架。
- (三) 大姬蛛因環境的不同，而改變結網的類型，分為：三角體型、吊帶型及輻射型。
- (四) 主網形狀可分為 12 種立體拓撲形狀，稜椎體為最普遍。不同網型結出主網型狀種類的數量不同：輻射型 > 三角體型 > 吊帶型。
- (五) 輻射型的最大投影面積、支撐絲總數與連結點總數，皆為最大。連結點總數愈多，支撐絲愈多。依據連結點數的多寡，複雜度：輻射型 > 三角體型 > 吊帶型。依據支撐絲的平均數量，穩固性：輻射型 > 三角體型 > 吊帶型。
- (六) 大姬蛛網有兩種生態功能：保護功能與獵食功能，且依網高指數與支架的有無，分成三種結網方式：包覆式結法、紮營式結法及倚靠式結法。
- (七) 大姬蛛會因已受精及生育卵囊，而改變網的功能與結網方式，保護功能網是由獵食功能網轉變或是重新再結網而成。
- (八) 若卵囊離開了網高指數 0.25~.0.75 的範圍，大姬蛛會將卵囊帶回原來的範圍內，且不改變網的結構。
- (九) 模擬自然環境中，不同類型的出現機率：輻射型 > 吊帶型 > 三角體型。

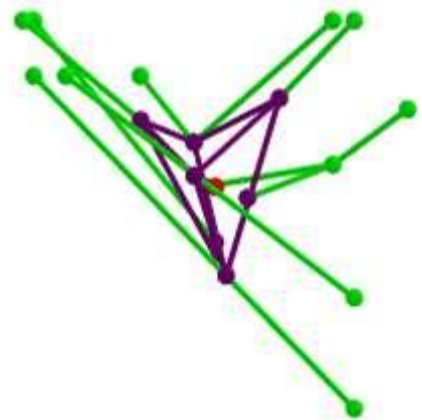




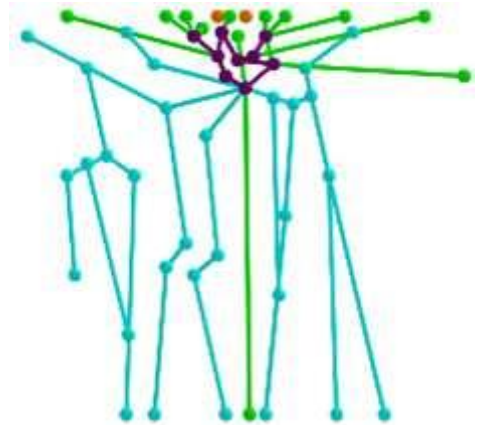
三角體型網包覆式結法



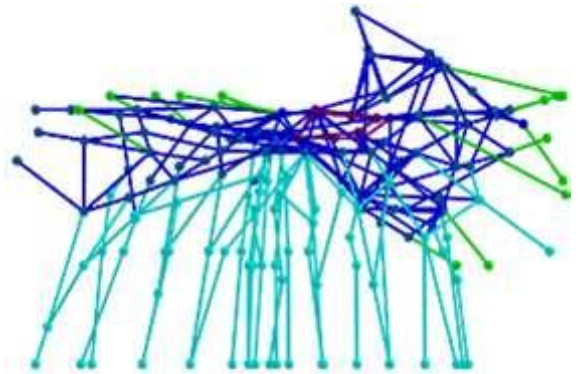
三角體型網紮營式結法



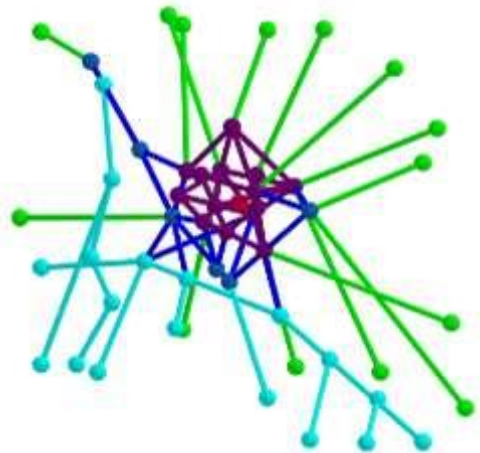
吊帶型網包覆式結法



吊帶型網倚靠式結法



輻射型網紮營式結法



輻射型網包覆式結法

二、應用

(一) 以往的研究中都以圓網或是立體的規則網為主角，研究內容包含蛛網的各部位功能、蛛網的力學結構、蛛網的振動模式、蛛網上的捕獵狀況等。然而卻很少有關不規則立體網的研究，所以藉由大姬蛛不規則的立體結構網，建立不規則立體蛛網的架構與類型的分類。

(二) 研究中大姬蛛網的結構會依照環境而有所改變，顯示出大姬蛛的結網靈活性。依大姬蛛網的型態與結網方式，判別環境上的差異，並運用於人工建築的架構。

(三) 經由大姬蛛網的研究及深入的剖析，其蜘蛛絲所結成的網絡架構，可將大姬蛛立體 3D 架構與蜘蛛網的力學原理相結合，探索 3D 蜘蛛網模型的未來應用。未來的努力可能以 3D 蜘蛛網啟發的結構，製作出高性能的輕型大規模結構，可以作為生活中安全防護網或纖維增強複合材料的設計，使用更少的材料以及簡易的設計，便可以達到功效。

伍、參考文獻

A.期刊論文

- 1.黃姿婷、洪哲為、蔡沛恩、廖均汶、王羿凱。2008。喜歡睡帳篷的蜘蛛-大姬蛛生態行為研究。中華民國第 48 屆中小學科學展覽會。
- 2.潘昱瑄、陳彥叡、江亞霖。2015。夏綠蒂 2D 和 3D 的世界。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。
- 3.潘冠儒、許尚軒、楊乃諺。2017。百「稈」交「姬」-簷下姬鬼蛛群體結網空間分布及卵囊中稈蠅蛹之研究。中華民國第 57 屆中小學科學展覽會。
4. Hesselberg, T., 2012. Web-building flexibility differs in two spatially constrained orb spiders. *J. Insect Behav.* 26: 283–303.

5. Hesselberg, T., 2015. Exploration behaviour and behavioural flexibility in orb-web spiders: A review. *Current Zoology*, Volume 61, Issue 2, 313–327.
6. Mortimer, B., Soler, A., Siviour, C.R., Vollrath, F., 2018. Remote monitoring of vibrational information in spider webs. *Sci. Nature* 105, 37.
7. Pasquet, A., Marchal, J., Anotaux, M., Leborgne, R., 2013. Imperfections in a perfect architecture: the spider orb web. *Eur J Entomol* 110 : 493–500.
8. Soler, A. and Zaera, R., 2016. The secondary frame in spider orb webs: the detail that makes the difference. *Scientific Reports*, 6.
9. Su, I., Qin, Z., Saraceno, T., Krell, A., Mühlethaler, R., Bisshop, A., Buehler, M. J., 2018. Imaging and analysis of a three-dimensional spider web architecture. *J R Soc Interface* 15(146) : 20180193.
10. Zaera, R., Soler, A. and Teus, J., 2014. Uncovering changes in spider orb-web topology owing to aerodynamics effects. *J. R. Soc. Interface* 11 20140484.
11. Harmer, A. M. T., Blackledge, T. A., Madin, J. S. and Herberstein, M. E., 2011. High-performance spider webs: integrating biomechanics, ecology and behaviour. *Journal of the Royal Society Interface* 8:457–471.

B. 書籍文獻

1. 陳世煌。2001。臺灣常見蜘蛛圖鑑，行政院農業委員會。
2. 朱耀沂。2007。蜘蛛博物學，天下文化。
3. Stewart, I., 2010。生物世界的數學遊戲。天下文化。

C. 網路資料

1. 七面體。維基百科。網址：<https://zh.wikipedia.org/wiki/七面體>。
2. 拓撲學。維基百科。網址：<https://zh.wikipedia.org/wiki/拓撲學>。

【評語】 050003

1. 利用拓撲學分析大姬蛛結網特性，具有創新性。
2. 網的結構分析詳盡、操作實驗考慮周延，是非常詳細研究的作品。
3. 缺乏對分類出的不同蛛網的結構力學上的探討，有努力的空間。
4. 實驗的數據量化應該加強，需要有重複數。