

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(二)科

佳作

032912

從空中看地面—用算樹實驗探討行道樹遮陽效果

學校名稱：高雄市立五福國民中學

作者： 國一 由明展 國二 陳詮穎	指導老師： 梁淑嬪 余尚芸
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：遮陽效果、植樹規劃

摘要

本研究運用多元的科技方法研究行道樹之規劃。先利用實際測量了解有無樹蔭對地表溫度之差異，再以 NDVI 數據資料探討六都種樹情形。算樹實驗過程以小型空拍機拍攝市區常見的樹種行道樹，運用 ImageJ 及 IC_Measure 程式軟體分析、計算樹冠、樹冠幅、樹冠幅蔭等面積，探討樹蔭大小和遮陽的關聯性，發現樟樹能提供較多樹蔭達降溫效果，是栽種行道樹的最佳選擇。最後自製道具實際模擬，得到最佳植樹高度公式為 $LH+W\tan\theta$ (單位:m)，其中 W:要遮住的路寬、LH:樹木枝下高、 θ :當地 12 點太陽仰角，藉「算樹實驗」可配合各地區的太陽仰角角度，計算不同時段的樹蔭面積，系統化規劃各地最適宜植樹高度，如在北回歸線位置 6m 寬的道路旁建議最低樹高約為 12m。

壹、研究動機

種樹是減碳、改善地球暖化與熱島效應最簡單的方法，許多國家和城市展現企圖心推動植樹抗暖的氣候行動。對於四季如夏的本地居民，特別是大熱天還需要外出的上班機車族、腳踏車族、行人...等，有樹蔭的地方就是天堂，如僅透過綠覆率仍無法獲得改善體感溫度下降的滿足感，只有真的大樹下才能做到。台灣的六個都會區有多少樹？到底要怎樣種樹才能同時有效提高綠覆率又能增加樹蔭？因此，我們想嘗試仿遙測之方法，利用不同的工具與方法，探討常見行道樹木之特徵，並進一步分析其數學量，如：形狀、面積、樹冠幅等...，希望能分析與其遮陽效果之關聯性，提供人多地少的有限區域有效種樹之最佳建議。

貳、研究目的

- 一、探討樹木之遮陽效果。
- 二、運用 NDVI 數據調查並探討六都綠覆情形。
- 三、運用算樹實驗探討行道樹之樹木特徵與遮陽效果之關係。
 - (一)運用算樹實驗探討常見行道樹之樹木特徵。
 - (二)探討常見行道樹之樹木特徵和樹蔭面積之關係。

參、研究設備與解釋名詞

(一)研究設備：空拍機、智慧型手機、相機、IC_Measure_2.0.0.245、ImageJ。

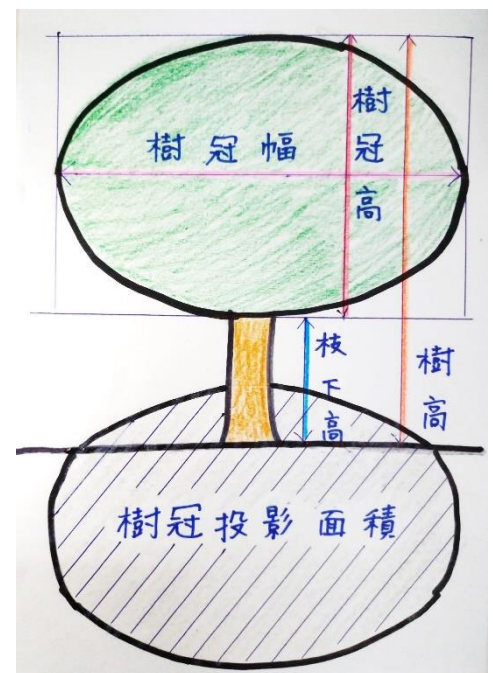


(二)解釋名詞：

1.樹冠：樹木的地上部由主幹(喬木)、主枝、側枝、結果枝、新梢等著生葉片構成，稱為樹冠。從樹體結構上分，樹冠主要由骨幹枝和輔養枝組成。
從根頸到第一主枝(沒有主枝則以第一個分枝)部分叫主幹。主幹以上的部分叫樹冠。

2.樹冠測量相關定義(如右圖所示，楊榮啟，2003)：

- (1)獨立樹高：簡稱樹高，一般是指從地面到枝幹頂端，整棵樹的垂直高度。
- (2)樹冠幅：又稱樹冠直徑，樹冠幅是指由側枝組成之樹冠寬，以量測林木之對角樹冠直徑之平均數。
- (3)樹冠高：樹冠層最下分枝點到主幹頂端的垂直高度。
- (4)枝下高：指從地面到樹冠的最下分枝點的垂直高度。
- (5)樹冠投影面積：以樹冠垂直投影計算面積。



3.綠覆率：綠覆率是一定範圍內(例如一個城市、一個社區或一塊建設用地)的綠地佔比的一種都市計畫指標，其具體定義、計算方法因地區而異。臺北市的《臺北市新建建築物綠化實施規則》規定綠覆率「指總綠覆面積與法定空地面積之百分比」。

4.常態化差值植生指標：歸一化植被指數(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)又譯標準化植被指數、常態化差值植生指標，是一個數值指標，通常是從太空來作觀測，用於分析遙感觀測所得到的資訊。NDVI通常是用衛星遙感數據計算，以評估目標地區綠色植被的生長狀況。計算方式是利用紅光與近紅外光的反射，

量化植被，能顯示出植物生長、生態系的活力與生產力等資訊。數值愈大表示植物生長數量愈多(引自維基百科)。公式如下：

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

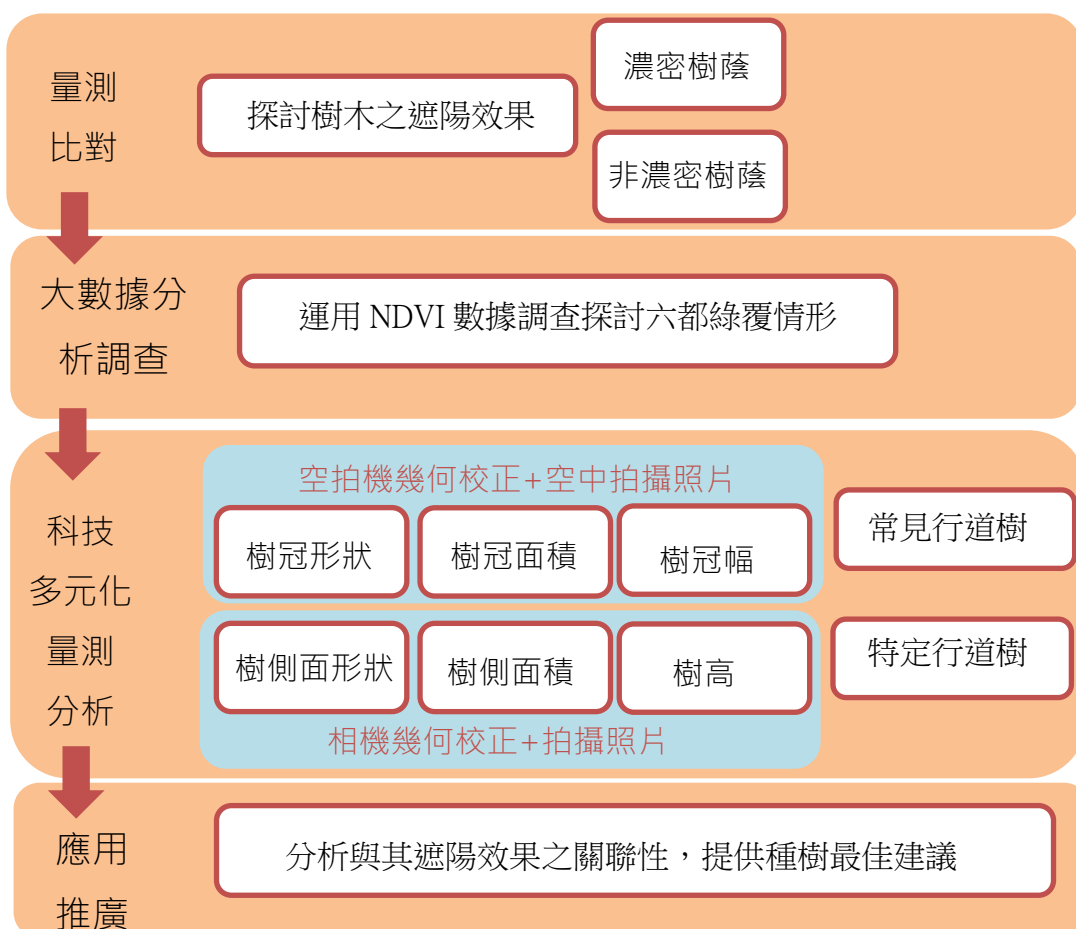
NIR 為近紅外光反射(植被反射)；RED 為紅光反射(植被吸收)，NDVI 之值介於-1 到 1 之間。當 RED=0 時，有最大值 1；反之，當 NIR=0 時，有最小值-1。

NDVI 為負值時，很可能是水；接近 1 時，則可能是濃密的綠葉。但是 NDVI 接近於 0 時，就沒有綠葉，甚至可能是一個城市化區域。

5.人均樹木分配數量：本研究所指之人均樹木分配數量乃計算該地區的居民每人可分配多少樹木數量，其計算公式如下：

$$\text{人均樹木分配數量} = \frac{\text{該地區所有樹木數量}}{\text{該地區人口數}}$$

肆、研究流程及步驟



伍、研究結果

一、探討樹木之遮陽效果

本研究在春季同一天同地點(110 年 3 月 10 日春季本地某行政區)8 時開始，每隔 1 小時進行陽光下及濃密樹蔭下、非濃密樹蔭下分別量測樹幹表面、土壤表面、柏油路面之溫度。為提升實驗外部效度，除實驗要求在同地點(樹與樹之間差距 $\leq 10\text{m}$)，樹幹表面量測高度皆統一貼近地表之樹幹表面處，並以額溫槍在貼近指定表面不超過 1cm 處重複量測 5 次，最後取平均值如下表 5-1：

表 5-1.不同位置不同時間樹幹表面量測溫度表

量測地點 \ 溫度(°C) \ 時間(時)	8 時	9 時	10 時	11 時	12 時	13 時	14 時	15 時	16 時
濃密樹蔭樹幹旁	22.7	23.6	24.2	25.4	25.8	25.6	24.9	24.8	24.7
濃密樹蔭土壤表面	23.0	23.9	24.3	25.3	25.9	25.6	25.3	25.0	24.7
濃密樹蔭柏油表面	23.1	25.1	25.4	25.9	26.4	29.8	26.4	26.2	26.2
非濃密樹蔭樹幹旁	24.9	25.2	27.7	27.3	29.2	32.7	33.3	32.6	29.6
非濃密樹蔭土壤表面	25.3	25.6	31.9	29.6	29.8	37.2	37.3	37.0	36.4
非濃密樹蔭柏油表面	23.0	27.0	25.5	36.3	39.7	39.9	43.1	41.1	37.1
陽光下樹幹旁	27.7	27.6	29.7	36.4	36.5	36.9	36.6	32.2	28.0
陽光下土壤表面	26.3	26.7	37.0	41.6	42.5	39.7	37.5	37.7	32.7
陽光下柏油表面	23.1	30.6	38.6	44.1	45.5	47.3	44.2	42.6	39.4
中央氣象局氣溫	21.0	23.0	24.0	24.0	24.0	25.0	25.0	25.0	25.0

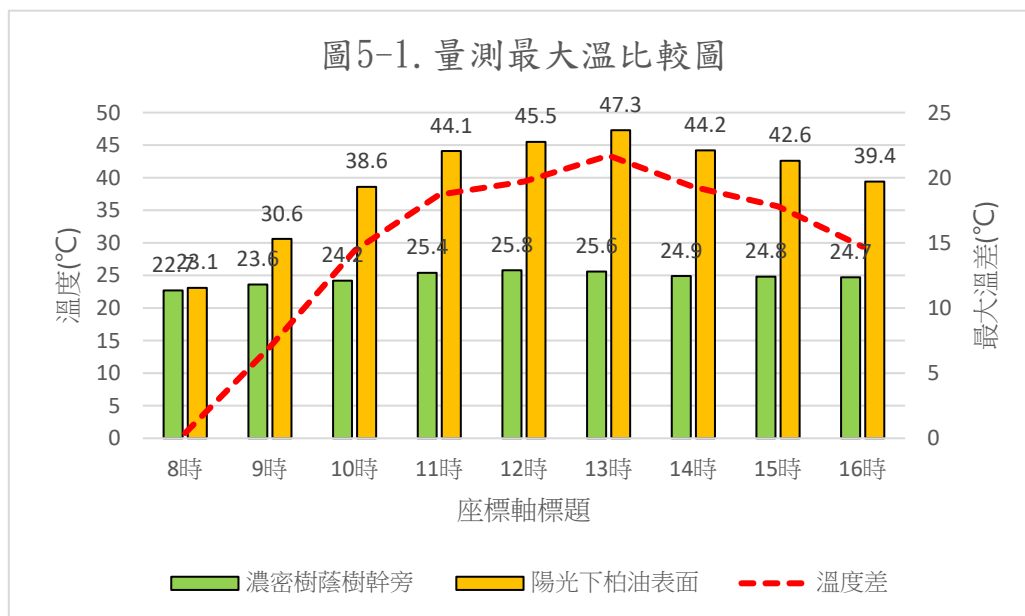
此處之濃密樹蔭意指 8 時~16 時之間，太陽仰角及方位如何改變，樹幹均能籠罩在樹蔭下的樹木；非濃密樹蔭則是雖樹木有樹蔭，但會隨太陽仰角改變而偶有樹幹被陽光照射之狀況的樹木。

發現：

- 1.由上表 5-1 及圖 5-1 可知，不管是什麼地點時間，濃密樹蔭之氣溫 < 非濃密樹蔭之氣溫 < 陽光下之氣溫，特別是中午 13 時，陽光下柏油路面溫度高達 47.3°C，而陽光下樹幹旁之溫度也有 36.9°C，相對於濃密樹蔭下柏油表面溫度 29.8°C，及濃密樹蔭樹幹旁溫度 25.6°C，溫差高達 17.5°C，令人無法在陽光下久待。
- 2.上午 8 時，所有地點的溫度都接近 24°C，太陽光下柏油表面的溫度部分比有樹蔭的位置

溫度低，推測是路面仍在吸收陽光的熱量，尚未釋出熱量。

3. 隨著時間的推移，量測地點的氣溫不斷的升高，12~14 時達到巔峰，在 14-15 時氣溫持續下降，16 時以後樹幹、土壤、柏油路都還留有餘溫，因此溫度都比上午高出一些，如圖 5-1。



結果：中央氣象局顯示該地區的氣溫均比濃密樹蔭、非濃密樹蔭、陽光下測得的溫度低，中午時段濃密樹蔭的降溫效果較上午更加明顯。因為中央氣象局氣溫是全區測量溫度，若依本研究數據顯示中央氣象局氣溫是較低的，中午時段，所處環境若在室外非濃密樹蔭區域或柏油路上，實際溫度則遠比氣象局顯示的氣溫高 10°C 以上，甚至在 13 時濃密樹蔭下溫度較周邊柏油路面相差接近 22°C，也就是若當施測地氣溫是 38°C 時，陽光下柏油路面相對高於 48°C，在陽光下，體感溫度更高達 44.1°C (當時風速 14km/hr，依文獻計算得知)，從 8 時至 16 時測得在濃密樹蔭樹幹旁的溫度維持 3°C (22.7°C~25.8°C) 以內的變化。因此大樹除了清淨空氣外，尚有微氣候的作用。可見濃密樹蔭是人類對自然環境舒適度非常重要的需求，而濃密樹蔭來自大樹，因此「大樹群數量之多寡」影響氣溫甚多。

由於大樹群數量之多寡影響人類對自然環境舒適度需求甚多，有樹冠覆蓋的林蔭城市，提供居民美化的生活空間，也幫助改善氣候變遷、空氣污染和生物多樣性缺乏等問題，「綠覆率」是一定範圍內的綠地佔比的一種都市計畫指標。我們所處環境的綠覆率真的偏低嗎？真正人群很多的都會區，每個人都能感受到大樹的遮陽效果嗎？到底數量是多少？因此本研究嘗試運用 NDVI 數據調查台灣六個主要城市綠覆情形，得到結果如下：

二、運用 NDVI 數據調查並探討六都綠覆情形。

透過衛星圖資所得到的綠覆率分布 (NDVI)，所使用的圖資 Landsat 8 達到 30 公尺*30 公尺的解析度，區分出「無植物」、「有草地或灌木」、「有大樹群」的三種現況，其中 NDVI 值為 0.0-0.2 推論為無植被，NDVI 值為 0.2-0.5 推論為草地灌木，NDVI 值為 0.5-1.0 推論為樹冠樹群，而在衛星圖資 NDVI 資料中，**紅色**顯示推論為**無植被**，**透明區域**推論為**草地灌木**，**淺綠色**推論為**樹冠樹群**，如下圖 5-2 和圖 5-3 示意。

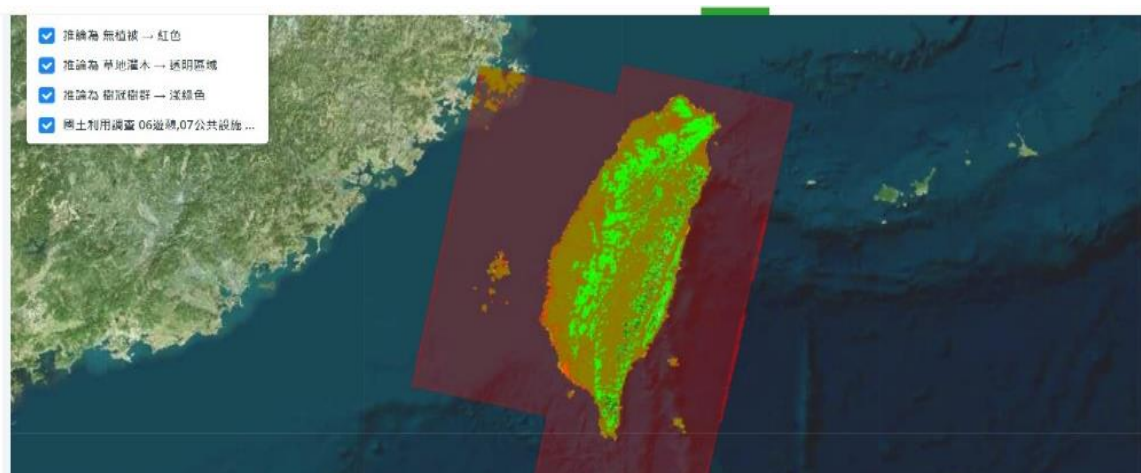


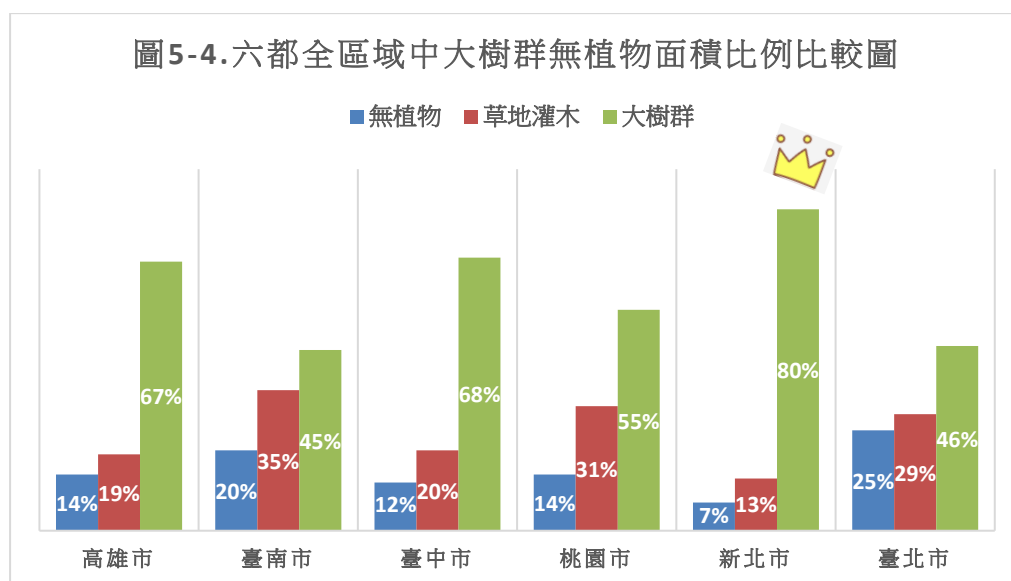
圖 5-2.全台 NDVI 示意圖(摘自 <https://sites.google.com/view/tree-taiwan/ndvi>)



圖 5-3.本研究地區 NDVI 示意圖(摘自 <https://sites.google.com/view/tree-taiwan/ndvi>)

(一)累計至 2020 年六都 NDVI 量測各區域無植物、草地灌木、大樹群分布範圍。

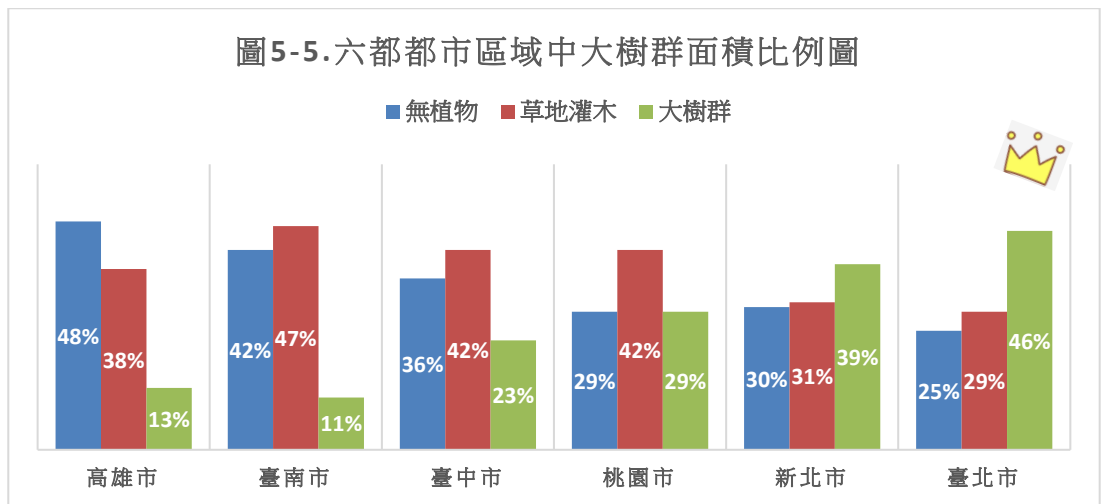
透過衛星圖資所得到的綠覆率分布 (NDVI)整理數據，並進一步繪製六都全區域中大樹群無植物面積比例比較圖(圖 5-4)



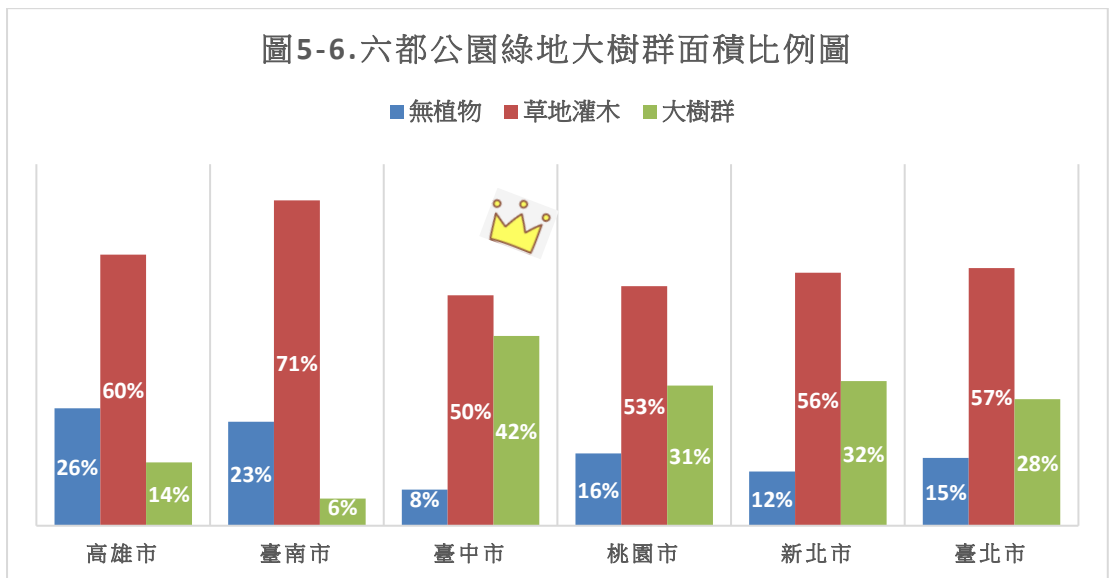
發現：根據圖 5-4，六都整體而言的 NDVI 大樹群對於該縣市面積範圍比例為新北市 >臺中市>高雄市>桃園市>台北市>台南市，即新北市 80%為大樹群佔據面積比例為六都之冠。六都整體而言的草地灌木面積範圍比例為臺南市>桃園市>台北市>臺中市>高雄市>新北市。六都整體而言的無植物對於該縣市面積範圍比例為台北市>台南市>桃園市=高雄市>臺中市>新北市。

但此計算方法卻是針對原各縣市佔有大樹群之面積與各縣市面積之比較，例如像如果某縣市的山區較多，綠覆率就會較高，因此新北市的 NDVI 大樹群對於該縣市面積範圍比例較多，是否能集中在人群較多的都會區呢？因此，我們再進一步比較六都中，人群集中的都市區域、休閒的戶外公園綠地及學校用地大樹群 NDV 數據，整理統計圖如圖 5-5、圖 5-6、圖 5-7：

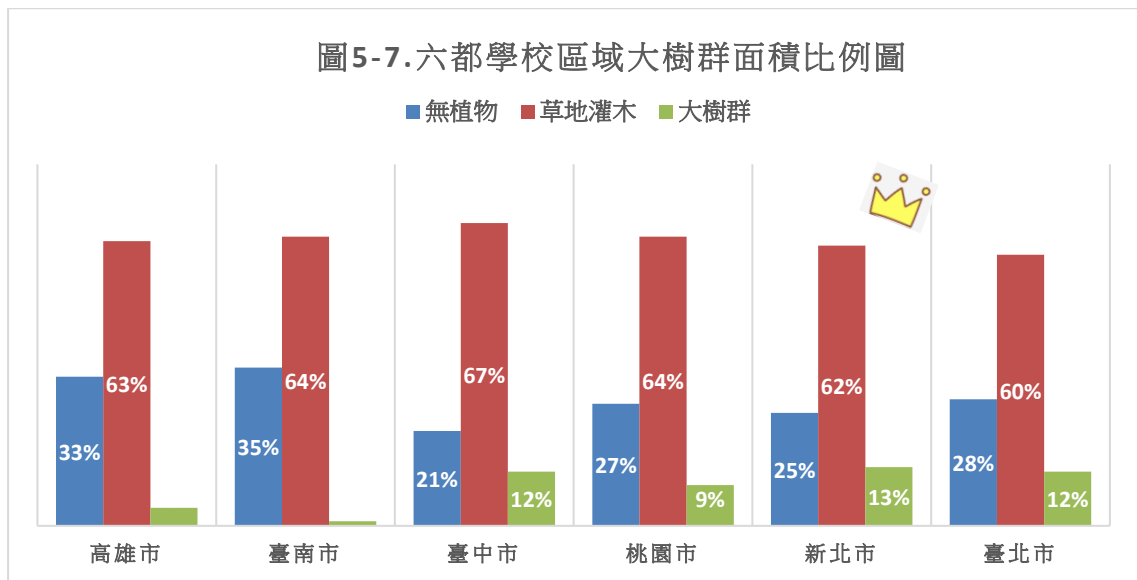
發現：1.根據圖 5-5，六都都市區域中，大樹群對於該縣市面積範圍比例不同於先前的資料，分別為台北市>新北市>桃園市>台中市>高雄市>台南市，台北市躍居第 1。六都都市區域中草地灌木對於該縣市面積範圍比例為臺南市>臺中市和桃園市>高雄市>新北市>臺北市。由此數據可知，台南市的草地灌木比例很高，但大樹群面積比例相對較少。



2. 根據圖 5-6，六都公園綠地區域中，大樹群對於該縣市面積範圍比例則是為台中市>新北市>桃園市>台北市>高雄市>台南市。六都公園綠地區域中草地灌木對於該縣市面積範圍比例則是為臺南市>高雄市>臺北市>新北市>桃園市>臺中市，在公園綠地裡，草地灌木佔地比例高，對環境的遮陽與降溫效果是否良好，值得深思。



3. 根據圖 5-7，六都學校的大樹群對於該縣市面積範圍比例則是為新北市>台中市=台北市>桃園市>高雄市>台南市，值得憂慮的是六都地區的學校其大樹群所佔比例皆小於 15%。六都學校的草地灌木對於該縣市面積範圍比例則是為台中市>桃園市=臺南市>高雄市>新北市>台北市，由此可見，學校種植的樹木大型皆太少，我們的學習環境，樹太少是值得關注與需要解決的重要問題。



結果：六都中，學校使用地的大樹群比例全部均比都市地區或公園綠地之大樹群比例還要低很多。例如高雄市都市地區、公園綠地和學校使用地之大樹群所占比例依序為 13%、14%、4%，學校大樹群比例竟比都市地區或公園綠地低三倍之多。

對照研究一結果，適宜人居的氣溫需要濃密樹蔭，濃密樹蔭來自大樹群，而非草地灌木，建議在居住場所的周遭多種一些大樹才能達到理想效果。因此我們好奇到底在我們居住的區域會有多少棵樹？

(二)至 2020 年由 NDVI 推論六都目前各有多少棵樹。

根據「台灣好植地」計畫(截至 2020 年,出自 <https://sites.google.com/view/tree-taiwan/>)中的數據顯示台灣總陸地面積約為 36193 平方公里，在 NDVI 量測後粗估森林土地約為 70%，假設有綠覆面積時，每 1 平方公尺會有 1 棵樹，推論台灣約有 253 億棵樹。

本研究仿「台灣好植地」計畫之內容，以『假設有綠覆之面積時，每 1 平方公尺會有 1 棵樹』為前提，推論六都目前各有多少棵樹，並進一步推算「人均樹木分配數量」表列如表 5-2，得到結果。

結果：從表 5-2.可知，高雄市平均每個人擁有約 716 棵樹，高居六都之冠，但身居高雄市的人們卻毫無這種幸福感，主要是可能 NDVI 數據調查乃屬於遙測影像分析，是透過衛星圖資所得到的大範圍大數據綠覆率分布，加上人口集中在都會區，而樹木種植多在山區，因此即便人均樹木分配數量最高的高雄市市民也很難感

受到自己被 700 多棵樹圍繞的幸福，對於四季如夏的高雄，研究一結果指出春季無樹蔭的室外環境中午高達 47.3°C，有濃密樹蔭的地方僅有 25°C，如果能夠在「人多地少的有限區域有效種樹」才是最佳策略。

表 5-2.六都人均樹木分配數量表

縣市	縣市面積(km ²)	NDVI>0.5 面積比例	NDVI>0.5 面積 (km ²)	樹量(棵)	人口(人)	人均樹木分配 數量(棵)
高雄市	2,952	0.67	1978	1977741108	2763057	716
臺南市	2,192	0.45	986	986243895	2642877	373
臺中市	2,215	0.68	1506	1506129824	2821464	534
桃園市	1,221	0.55	672	671524700	2268807	296
新北市	2,053	0.80	1642	1642053360	4029493	408
臺北市	272	0.46	1252	125027862	2602418	48

根據研究二結果，本研究關注於直接影響高溫道路周邊行道樹之遮陽效果，好奇行道樹之樹木特徵，並探討其與遮陽效果之關係。

三、運用算樹實驗探討行道樹之樹木特徵與遮陽效果之關係。

(一)運用算樹實驗探討常見行道樹之樹木特徵與遮陽效果。



本研究運用算樹實驗探討若不同樹種之樹木特徵與其遮陽效果關聯性為何？根據本市養工處發行的○○市行道樹導覽手冊(2013)，發現本市的行道樹多達 74 種，雖然樹木隨處可見，但因考量要收集樹冠面積、樹木側面積、樹冠幅等等，故❶排除拍攝時間是落葉期、枯葉期的樹種，加上空拍機的使用限制，挑選❷同時會種植在大區域公園的行道樹樹木，以下是在某都會公園用空拍機、相機收集到的樹種照片。





1.運用算樹實驗探討常見行道樹之樹木特徵


在某都會公園挑選符合上述條件的落羽松、土肉桂、樟樹、棕欖樹之空拍、側拍照片進行分析，整理樹木外觀特徵如表 5-3：

表 5-3.某都會公園樹木外觀特徵分析表

樹種	樹冠輪廓	樹冠邊緣	樹冠表面	樹冠數量
落羽松 1	心形	鈍鋸齒	連續	單冠
落羽松 2	不規則形	鈍鋸齒	非連續	多冠
土肉桂 1	圓形	纖毛狀	連續	單冠
土肉桂 2	盾形	纖毛狀	連續	單冠
土肉桂 3	圓形	纖毛狀	連續	單冠
樟樹 1	不規則形	鈍鋸齒	連續	多冠
樟樹 2	圓形	纖毛狀	連續	多冠
棕櫚 1	圓形	裂緣	非連續	單冠
棕櫚 2	圓形	裂緣	非連續	單冠
棕櫚 3	圓形	裂緣	非連續	單冠

備註：①樹冠輪廓中圓形為, 不規則形為,

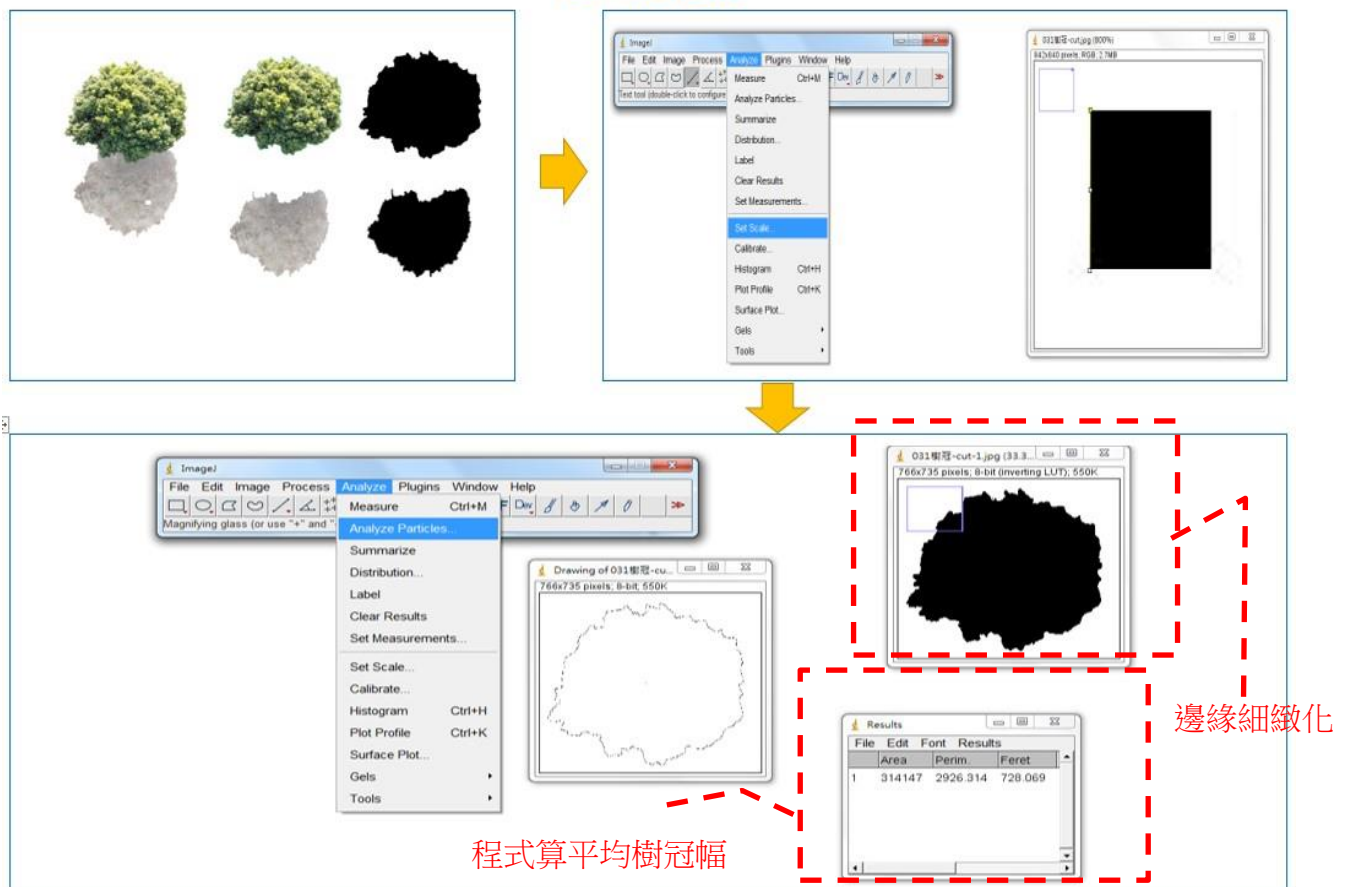
②樹冠邊緣分成全緣為、鈍鋸齒緣、裂緣、纖毛狀

③樹冠表面可分成連續、非連續,

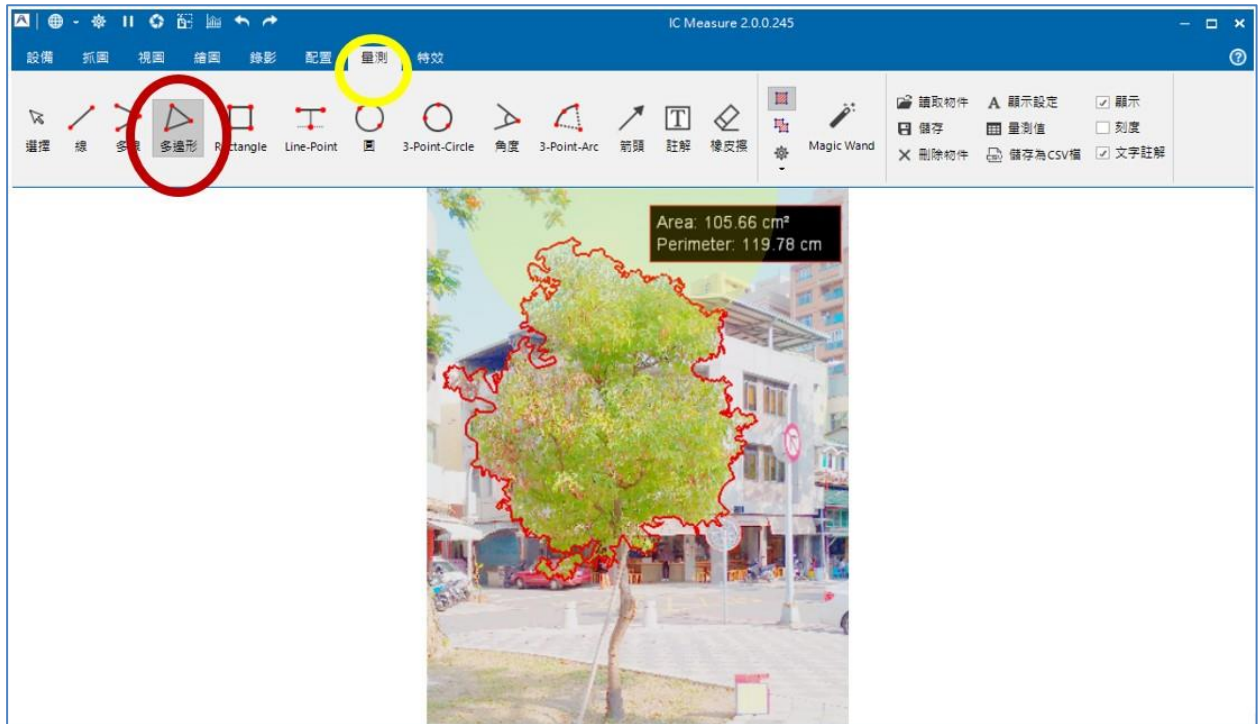
④樹冠數量可分成單冠及多冠, 此乃側視圖示。

接下來，使用 Image J 及 IC Measure 的電腦軟體處理照片，ImageJ 操作流程如下：

Image J 操作過程：



並輔以 IC Measure 電腦軟體處理照片，操作流程如下:



以落羽松為例，圖 5-8、圖 5-9 分別為側拍及空拍處理後的照片，並進行分析：

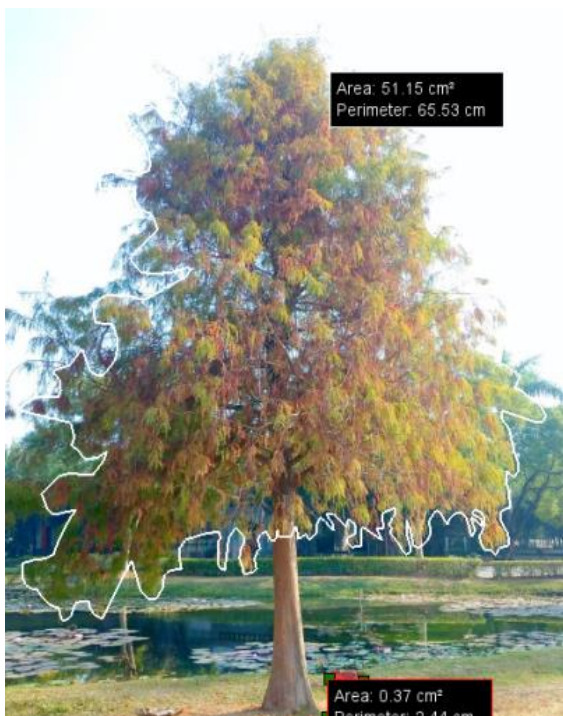


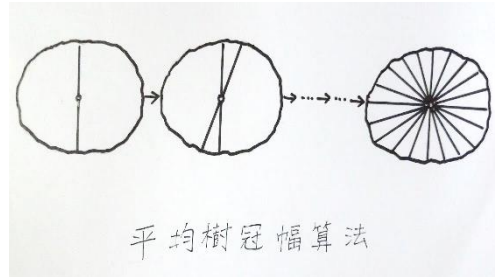
圖 5-8.落羽松側拍處理後照片



圖 5-9.落羽松空拍處理後照片

電腦軟體處理分析流程為：

步驟① 依據相機與空拍機所拍攝下的各個樹種側面圖及空拍圖，進行測量樹高、樹冠高，樹冠幅、樹冠及樹冠蔭之面積及周長。



步驟② 利用 IC Measure 及 Image J 的電腦軟體，量測出圖形上的各種所需的數據資料。

步驟③ 進行比例尺的計算轉換，推算出各種樹種之樹冠資料的實際數據。

(圖片上的長度：實際長度 = 圖片上的樹冠數據：實際的樹冠數據)

其中平均樹冠幅乃利用 Image J 內建及自行設計之程式，分析所有樹冠每一段長度進行平均。

步驟④ 但經分析後樹冠幅長短落差甚大，故『配合 Image J 內建及自行設計之程式，分析所有樹冠每一段長度進行平均，稱之為平均樹冠幅』

過程中照片面積或長度相關數據分析部分，為求高有效度，分別使用上述不同軟體進行處理，得到多個分析之數據後進行平均，獲得最後數據。

經由上述步驟，得到多種行道樹樹冠側拍空拍照片整理表(表 5-4)：

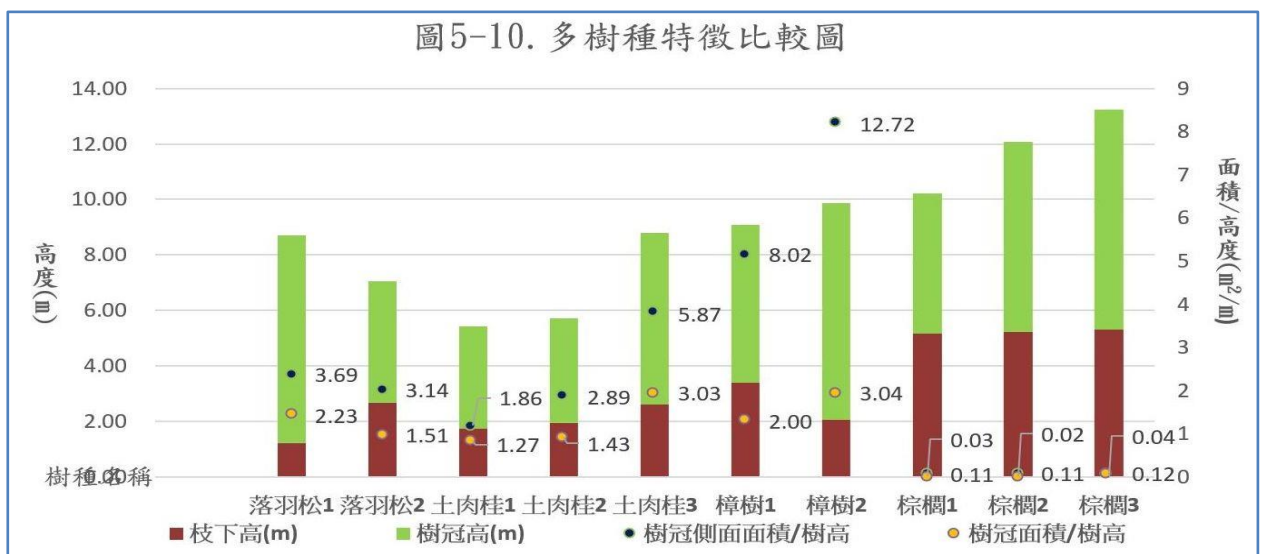
表 5-4.多種行道樹樹冠側拍空拍照片整理表

樹種	樹冠側拍			樹冠空拍	
	原圖	樹高/樹寬分析	面積分析	原圖	處理後圖
落羽松 1					
落羽松 2					
土肉桂 1					
土肉桂 2					

樹種	樹冠側拍			樹冠空拍	
	原圖	樹高/樹寬分析	面積分析	原圖	處理後圖
土肉桂 3					
樟樹 1					
樟樹 2					
棕櫚樹 1					
棕櫚樹 2					
棕櫚樹 3					

由原始數據整理如附件一(同地點多種行道樹樹冠特徵原始數據表)及附件二(同地點多種行道樹樹冠特徵數據分析表，此處連同後續研究的空拍樹蔭相關數據等一併整理)：

針對樹冠高、枝下高、 $\frac{\text{樹冠側面面積}}{\text{樹高}}$ 、 $\frac{\text{樹冠面積}}{\text{樹高}}$ 繪製成多樹種特徵比較圖(圖 5-10)如下：



發現：

1.從圖 5-10 及附件二(同地點多種行道樹樹冠特徵數據分析表)得知，行道樹中

(1)樹高前三名是：棕欖 3>棕欖 2>棕欖 1。

(2) $\frac{\text{樹冠側面面積}}{\text{樹高}}$ 前三名是：樟樹 2>樟樹 1>土肉桂 3。

(3) $\frac{\text{樹冠面積}}{\text{樹高}}$ 前三名是：樟樹 2>土肉桂 3 >樟樹 1。

可見不同樹種間，並沒有因為樹高(樹冠高+枝下高)的數值愈大，其樹冠面積、樹冠側面積會愈大，特別是棕欖樹，樹雖高但樹冠側面面積卻很小。因此可以推斷樹高的大小不是決定樹冠側面面積、樹冠面積的主要原因。

2.樟樹雖然不是最高，但 $\frac{\text{樹冠側面面積}}{\text{樹高}}$ 之比值相對於樹高卻是較高的；而從 $\frac{\text{樹冠面積}}{\text{樹高}}$ 之比值也雷同。顯見其遮陽效果相對較好。










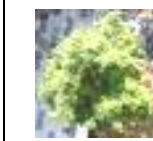


3.從照片外觀型態及某都會公園樹木外觀特徵分析表進行比較，發現落羽松顏色鮮明(季節性落葉)但枝葉卻稀疏；三棵土肉桂雖然並不高大(生長緩慢)，但是樹冠大而樹幹小，如果形成樹蔭，行人、車等很難從樹下通過；三棵棕欖樹樹很高(難抵擋颱風肆虐)，但樹冠太小；整體而言，樟樹樹幹高度適中，樹冠大並呈現連續多冠狀，外觀邊緣呈現纖毛、鈍鋸齒狀且濃密。根據臺灣地區重要針闊葉樹種立體像對判釋之研究成果報告書(2013)(節錄詳見附件三)，**樟樹整年長青**，沒有枯葉時期，根莖葉花果整株皆有用，四處都有栽種，植栽數量極多，因此行道樹中若要選擇濃密樹蔭之植樹對象，**樟樹是最佳代表**。































就生物學的統計顯示，相同物種的數量需達到 30 以上取其平均值，才能降低生物多樣性的個別差異。因此，我們選擇遮陽效果佳的樟樹 30 棵進行測量，探討樟樹之樹木特徵是否如研究三(一)1 之結果：



















2.運用算樹實驗探討樟樹之樹木特徵

公園不同區域及校園中最後挑選符合條件的 30 棵樟樹之空拍、測拍照片(表 5-5)：

表 5-5.三十棵樟樹之空拍測拍照表

編號	A1	A2	A3	A4	B1	B2
樹冠側拍						
樹冠空拍						

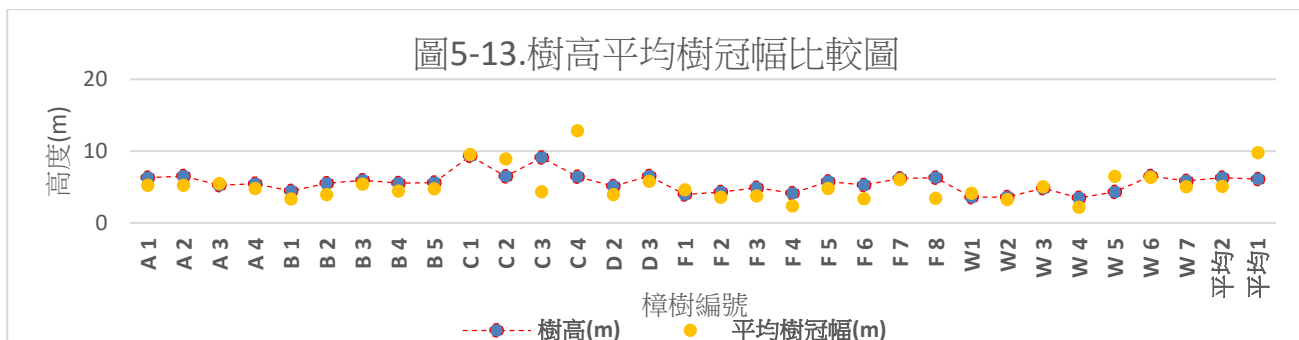
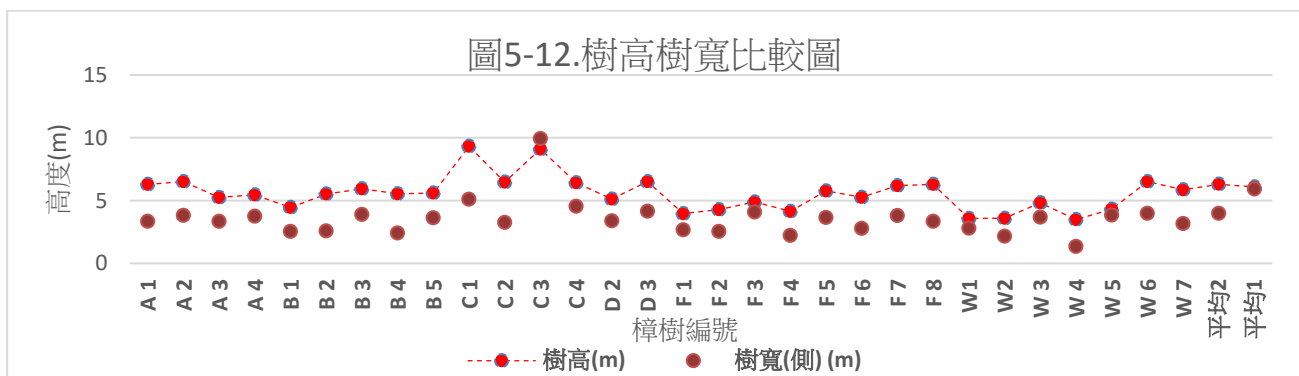
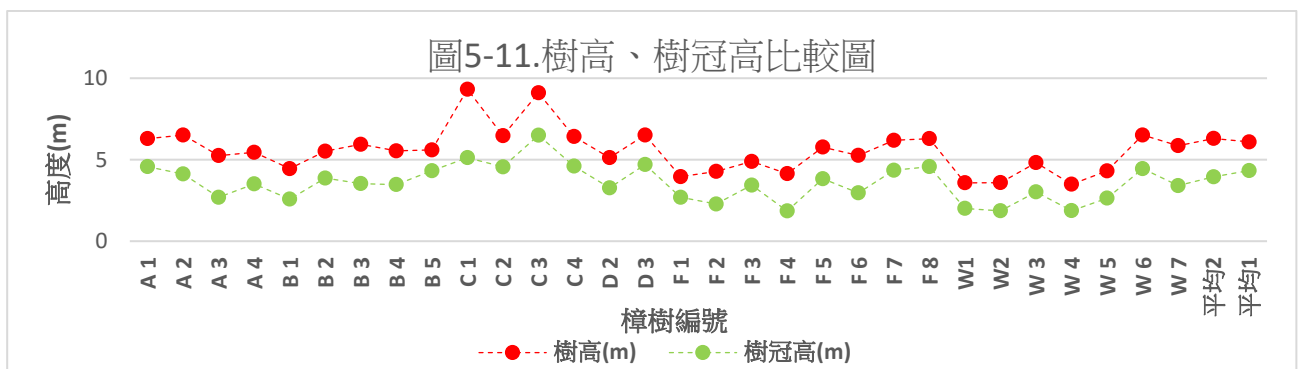
編號	B3	B4	B5	C1	C2	C3
樹冠側拍						
樹冠空拍						
編號	C4	D2	D3	F1	F2	F3
樹冠側拍						
樹冠空拍						
編號	F4	F5	F6	F7	F8	W1
樹冠側拍						

編號	F4	F5	F6	F7	F8	W1
樹冠空拍						
編號	W2	W3	W4	W5	W6	W7
樹冠側拍						
樹冠空拍						

分析 30 棵樟樹的樹冠形狀及邊緣等特徵，並進一步做分類**發現**：

- ① 樹冠輪廓中有圓形 (如 A2、D3、W1、W7)，不規則形 (如 A1、B5、C1、F2)、心形(如 F7)
- ② 樹冠邊緣分成全緣 (如 W1、D3、)、鈍鋸齒緣 (如 W4)、裂緣 (如 A1、C1、F2)、纖毛狀 (如 W4、W7)
- ③ 樹冠表面可分成連續 (如 B3、D3、F8、W1)、非連續 (如 F7、W2、W6)
- ④ 樹冠數量可分成單冠 (如 D3、F6、F8、W5)及多冠 (如 A4、B5、F1、W6)，此乃側視圖示。

接下來，使用 IC Measure 及 Image J 的電腦軟體並運用研究三(一) 1 電腦軟體處理流程進行分析，處理後原始數據如附件四，再根據附件四整理數據，將 30 棵樟樹數據進行平均(平均 2)，並與之前研究三(一)1 的兩棵樟樹平均數據(平均 1)進一步比較如下：



發現：1.由樹高、樹冠高比較圖(圖 5-11)可知，樹高、樹冠高的趨勢幾乎相似，樹高越高、樹冠高越高。

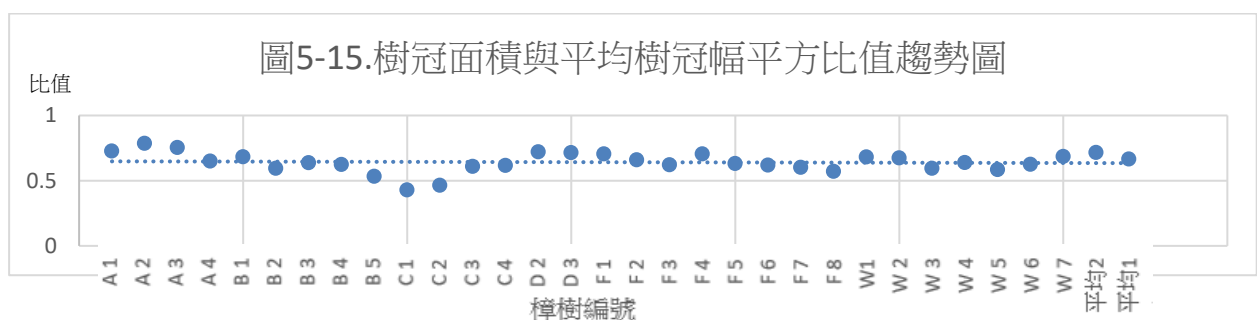
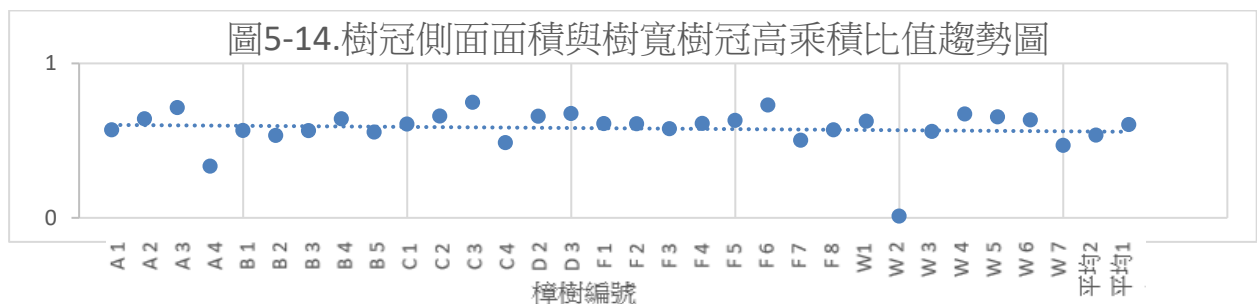
2.由樹高樹寬比較圖(圖 5-12)可知，樹高、樹寬的趨勢大致一致，樹高越高、樹寬越大。而部分樹高樹寬趨勢不一致的樟樹，推測可能因為生長時樹距不足或修剪造成。

3.由樹高平均樹冠幅比較圖(圖 5-13)可知，樹高、平均樹冠幅的趨勢大致一致。而部分樹高平均樹冠幅趨勢變化較大的樟樹，推測可能因為生長樹距不足或修剪造成。

整體而言，根據樹高、樹冠高、樹寬(側面)與平均樹冠幅比較圖，30 棵樟樹雖然樹高、樹冠高、樹寬、平均樹冠幅完全不同，除了 C4 因樹齡較高，平均樹冠幅較大，其餘絕大部分四者趨勢一致，意即樹高越高、樹冠高越高、樹寬越寬、平均樹冠幅值越大，且此趨勢 30 棵平均與研究三(一)1 中平均結果一致。

進一步將 30 棵樟樹數據、平均 1(研究三(一)1 的兩棵樟樹平均數據)、平均 2(30 棵樟樹數據進行平均)的樹冠側面面積與樹冠面積做趨勢分析，此處趨勢則是算出 $\text{①} \frac{\text{樹冠側面面積}}{\text{樹冠高} \times \text{樹寬}}$

(=比值 1) $\text{②} \frac{\text{樹冠面積}}{\text{平均樹冠幅} \times \text{平均樹冠幅}}$ (=比值 2)，如附件五，並繪製統計圖(圖 5-14、圖 5-15):



發現：經推算得知，大部分樹冠側面面積、樹冠面積與樹高、樹冠高、樹寬的關聯性，不管是從樹冠側面面積與樹寬樹冠高乘積比值趨勢圖(圖 5-14)或是樹冠面積與平均樹冠幅平方比值趨勢圖(圖 5-15)來看，這些比值會趨近於一定值(趨勢線)，可見相同物種的樟樹族群特徵應該會相似。推論此結果，樹木之間或許外觀不盡相同，但同種

樹木卻有相似之特徵。

接續以「自變項: 樹冠面積、平均樹冠幅平方」、「依變項: 樹冠面積與平均樹冠幅平方比值」進行迴歸分析，得到表 5-6。

表 5-6 樹冠面積、平均樹冠幅平方與樹冠面積、平均樹冠幅平方比值迴歸分析表

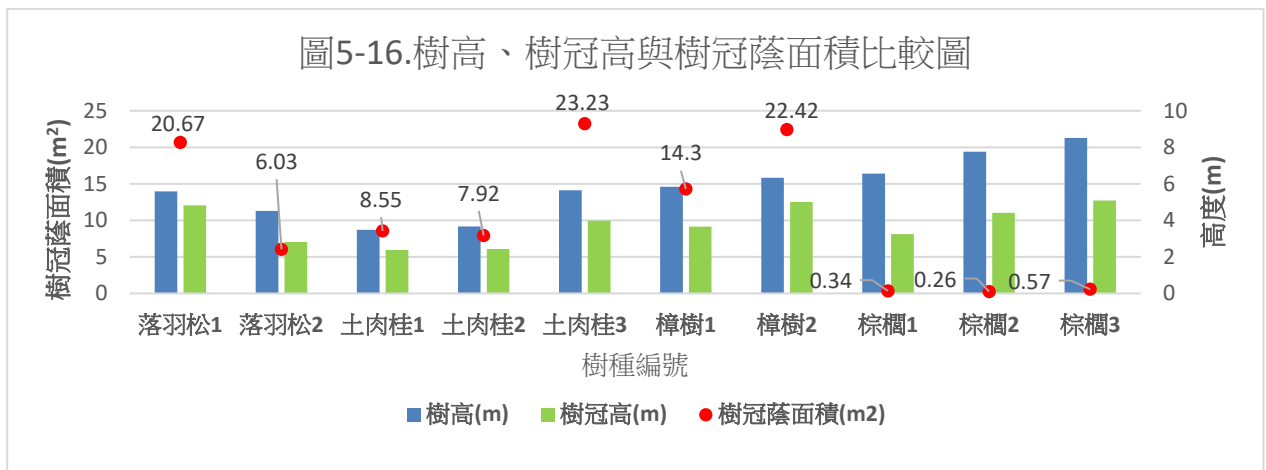
迴歸統計	
R 的倍數	0.86675274
R 平方	0.75126031
調整的 R 平方	0.73410585
標準誤	0.03920279
觀察值個數	32

由表 5-6 中的「R 的倍數」為依變項和自變項的相關係數，即「樹冠面積與平均樹冠幅平方比值」和「樹冠面積、平均樹冠幅平方」的相關係數約為 0.8668，從觀察數值來看，樣本數不多(32 個)，所以應看調整後的 R 平方.734，也就是決定係數為.734，代表此值有相當的解釋力。

我們好奇，影響周遭氣溫的樹蔭是否和樹木特徵相關呢?根據研究三(一)之結果，發現樹木之間外觀不盡相同，但同種樹木卻有相似之特徵，因此，我們接續針對研究三(一)符合條件的常見行道樹，進行樹蔭之空拍處理並同樣使用研究三(一)電腦處理流程，整理如附件一及附件二，進行樹蔭與樹木特徵之間關聯性作探討:

(二)探討常見行道樹之樹木特徵和和樹蔭面積之關係

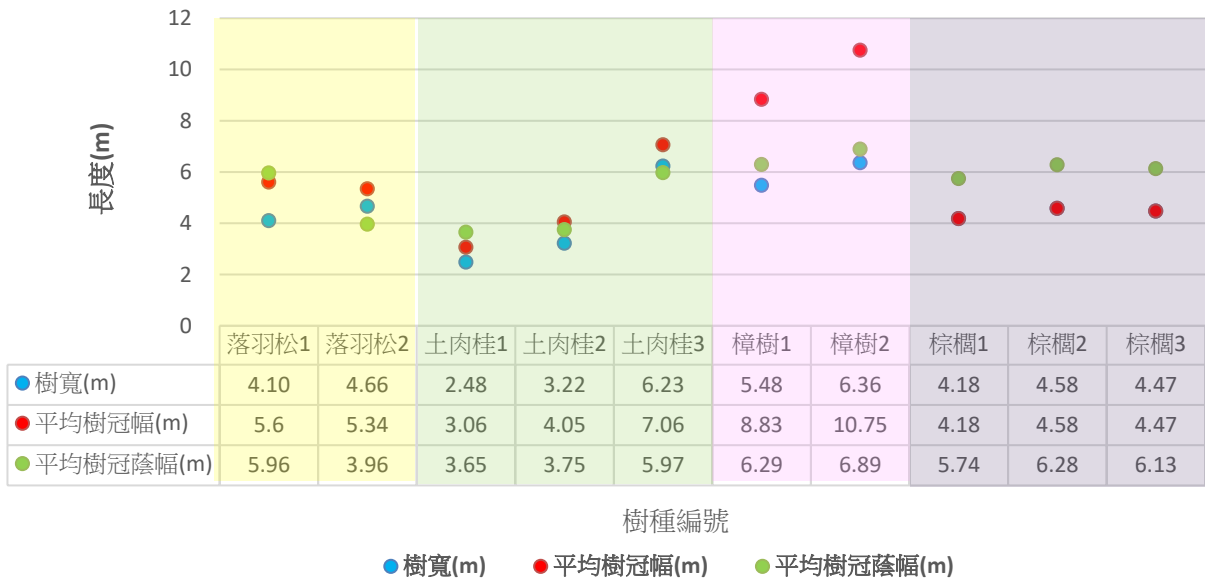
首先，我們比較同區域常見行道樹樹高、樹冠高與樹冠蔭面積(詳細數據見附件一、四)，進一步分析如樹高、樹冠高與樹冠蔭面積比較圖(圖 5-16):



發現：由圖 5-16 得知，樹越高或樹冠高越高，樹冠蔭面積並沒有越大，如棕櫚樹；此結果和樹冠面積、樹冠側面積對比於樹高、樹冠高的結果雷同。

繼續分析，繪製樹寬、平均樹冠幅與平均樹冠蔭幅比較圖(圖 5-17):

圖5-17.樹寬、平均樹冠幅與平均樹冠蔭幅比較圖

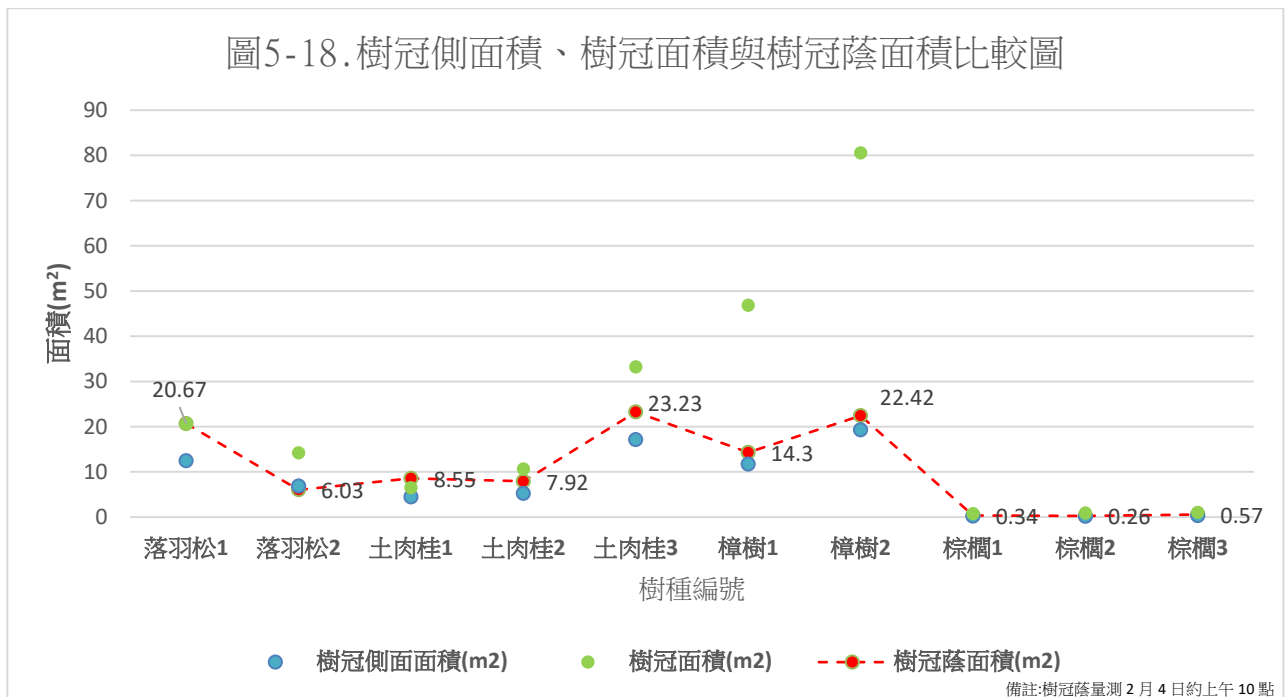


發現： 1.由圖 5-17 得知，幾乎所有樹種的平均樹冠蔭幅和平均樹冠幅的趨勢一致，呈現正相關。亦即若要取得樹冠蔭幅大小，只要知道樹冠幅即可。

2.從圖 5-17 色塊與圖中對應數據可以發現當樹寬、平均樹冠幅、平均樹冠蔭幅趨勢分布不同，這可能是樹種不同、外形特徵不同造成的。或許將來可有機會可以進一步調查或實驗「種植同一物種的植物所花的時間和遮陽效果比較、樹木特徵之關聯性」。

進一步針對平均樹冠幅、樹冠面積、樹冠側面積與平均樹冠蔭幅、樹冠蔭面積相關數據對照比較(附件二)，發現樹冠側面積、樹冠面積、樹冠蔭面積可能有關聯性，繪製比較圖(圖 5-18)如下:

圖5-18. 樹冠側面積、樹冠面積與樹冠蔭面積比較圖



發現：1.從上圖 5-18 可知，幾乎所有樹種的樹冠蔭面積和樹冠側面積的趨勢一致，呈現正相關；若要取得樹冠蔭面積大小，只要知道樹冠側面積，佐以樹冠面積即可推知樹冠蔭面積，但以樹冠側面積為主。

2.附件二分析表中亦呈現(1) $\frac{\text{樹冠側面積}}{\text{樹高}}$ 值越大，樹冠蔭面積越大。

(2) $\frac{\text{樹冠面積}}{\text{樹高}}$ 值越大，樹冠蔭面積越大。

(3) $\frac{\text{樹冠面積}}{\text{樹冠高}}$ 值越大，樹冠蔭面積越大。

3.綜合以上結果，我們得知樟樹相較於其他樹種，無落葉季節，擁有大的樹冠面積能達到遮陽效果，適合作為行道樹的選擇。

陸、討論

■樹蔭規劃及行道樹植樹規劃結果

根據上述研究結果，得知樟樹是行道樹種植的較佳樹種，樹蔭跟樹側面積、樹冠面積有關，我們也發現不同時間的樹蔭會跟著變化，此乃時間不同、太陽仰角也不同。

太陽仰角與地點時間有關，本研究以當時研究的地點—某都會公園(利用 google 地圖定位算出該地點之經緯度 22.623, 120.337 (取至小數點後第 3 位))為定位點，算出太陽仰角，以 2 月 3 日 9:50 為例，**太陽仰角為 37.6°**。並進一步整理該地(經緯度 22.623, 120.337) 8 時~16 時四個主要節氣之太陽仰角，如附件六。



接續嘗試自製道具(樟樹、道路、太陽行進路線、不同時間仰角的定位...等)進行模擬。

一、自製道具、設計程式、拍攝影片，模擬不同時期、不同時間模擬北迴歸線位置樹影變化。

圖 6-1 為北迴歸線夏至竿影變化圖，我們自製道具(如圖 6-2)標時間、固定角度傾斜模擬北迴歸線位置樹影變化。

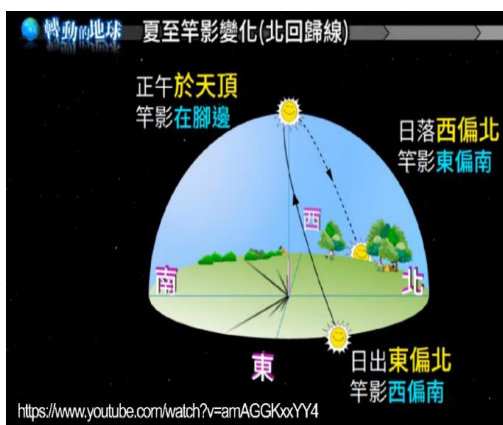


圖 6-1 北迴歸線夏至竿影變化圖



圖 6-2 夏至不同時間自製道具模擬



圖 6-3 夏至東西向 9 點樹蔭模擬圖

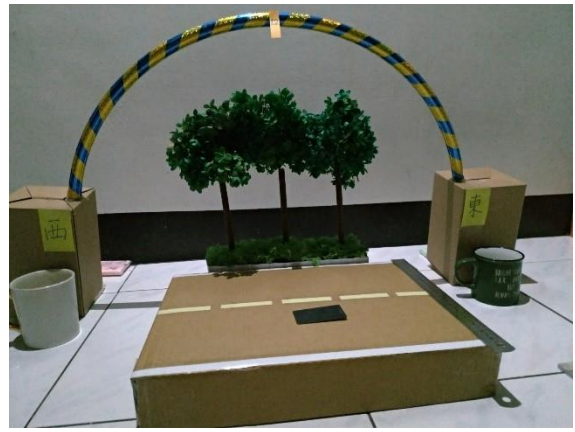


圖 6-4 夏至東西向 12 點樹蔭模擬圖

發現： 1.由圖 6-3、6-4 得知，夏至時期不管何時東西向道路的樹蔭遮陽效果不佳(遮不到道路路面)。

2.由圖 6-5、6-6、6-7、6-8 得知，經實際模擬單棵仿樟樹之樹冠高為 14.1cm、樹冠寬為 13.8cm，樹冠面積為 187.45cm²，

① 9 時到 12 時之樹冠蔭面積範圍為 2.62cm² ≤ 樹冠蔭面積範圍 ≤ 165.26cm²

② 9 時到 12 時之樹冠蔭高範圍為 0.20cm ≤ 樹冠蔭高範圍 ≤ 12.43cm²

③ 9 時到 12 時之樹冠蔭寬範圍為 0.19cm ≤ 樹冠蔭寬範圍 ≤ 12.19cm



圖 6-5 夏至南北向 9 點樹蔭模擬圖



圖 6-6 夏至南北向 10 點樹蔭模擬圖



圖 6-7 夏至南北向 11 點樹蔭模擬圖



圖 6-8 夏至南北向 12 點樹蔭模擬圖

接下來，想實際應用到真實情境道路上。

二、根據道路規則，探討不同路寬道路，在不同時間需要的樹高為何

根據道路規則，分別探討 6m、12m、18m、24m、30m 寬道路(遮到中間分隔島處，如下頁圖)，在不同時間需要的樹高為何。如下表 6-1:

表 6-1.不同時間需要之樹高表

路面寬度(m)	節氣	8 時	9 時	10 時	11 時	12 時	13 時	14 時	15 時	16 時
6 (遮到中間分 隔島處)	春分	1.47	2.46	3.81	5.67	7.14	6.10	4.16	2.70	1.65
	夏至	2.11	3.41	5.72	12.03	214.85	12.31	5.79	3.44	2.13
	秋分	1.71	2.80	4.34	6.44	7.54	5.84	3.86	2.48	1.47
	冬至	0.87	1.53	2.17	2.69	2.89	2.66	2.11	1.47	0.82
12 (遮到中間分 隔島處)	春分	2.93	4.91	7.63	11.33	14.28	12.20	8.32	5.40	3.30
	夏至	4.22	6.81	11.43	24.07	429.69	24.62	11.58	6.88	4.27
	秋分	3.42	5.60	8.67	12.87	15.08	11.68	7.71	4.95	2.94
	冬至	1.75	3.06	4.35	5.39	5.78	5.31	4.22	2.93	1.63
18 (遮到中間分 隔島處)	春分	4.39	7.37	11.44	17.00	21.41	18.29	12.48	8.11	4.95
	夏至	6.33	10.21	17.14	36.10	644.54	36.92	17.37	10.32	6.40
	秋分	5.14	8.40	13.00	19.30	22.62	17.51	11.56	7.42	4.41
	冬至	2.62	4.59	6.52	8.08	8.66	7.97	6.33	4.39	2.45
24 (遮到中間分 隔島處)	春分	5.86	9.82	15.25	22.67	28.55	24.39	16.64	10.81	6.60
	夏至	8.44	13.61	22.86	48.13	859.38	49.23	23.15	13.76	8.53
	秋分	6.85	11.19	17.33	25.74	30.16	23.35	15.42	9.89	5.88
	冬至	3.49	6.12	8.69	10.77	11.55	10.62	8.44	5.86	3.26
30 (遮到中間分 隔島處)	春分	7.32	12.28	19.06	28.33	35.69	30.49	20.80	13.51	8.25
	夏至	10.54	17.02	28.57	60.16	1074.23	61.53	28.94	17.20	10.66
	秋分	8.56	13.99	21.67	32.17	37.70	29.19	19.27	12.37	7.35
	冬至	4.36	7.65	10.86	13.46	14.44	13.27	10.54	7.32	4.08

備註:①以春分、夏至、秋分、冬至為時間例

②經緯度 22.623, 120.337 四個節氣時間 8 時~16 時太陽仰角詳見附件六

- 發現：**1.由表 6-1，若要在夏至中午 12 時讓樹蔭遮住 6m 寬道路(遮到中間分隔島處)需要 214.85m 樹高的樹木。而 13 時陽光照射路面反射輻射熱易使人感到不舒適，樹蔭遮住 6m 寬道路(遮到中間分隔島處)需要 12.31m 樹高的樹木。簡言之，經本研究可以系統化規劃各地植樹最適宜高度。
- 2.以樟樹為例，夏至(6 月 22 日)時分路面高溫及陽光照射難耐的時間約在 13~15 時。

由圖 6-9 得知，隨著太陽照射角度的移動，在 13 時能遮蓋路面的所需樹高為最大值，在此我們提供修剪樹高的最低高度。大多數路寬為 12~18m，亦即行道樹的樹冠頂高 24.62 m~36.92 m 左右，可使用路人獲得較舒適的行車環境。

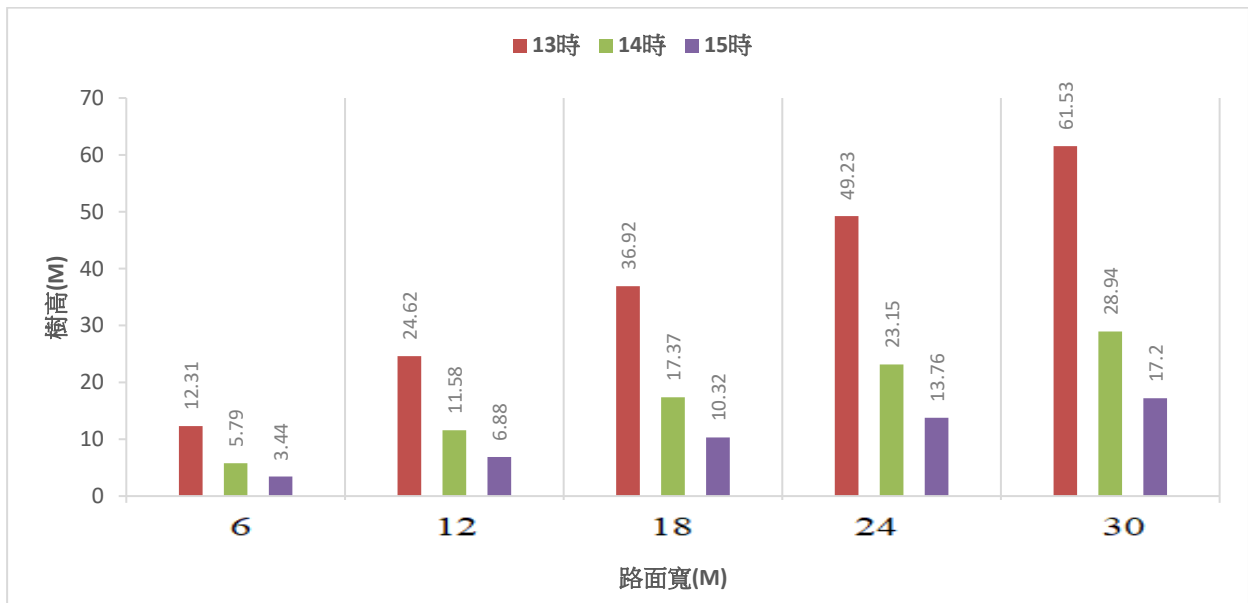


圖 6-9.不同路面寬 13、14、15 時之樹高圖

總結:1.行道樹的選擇有別於公園或其他區域植樹，主因在於行道樹種植地點在高溫的柏油路旁，因此種植行道樹的條件應該要考慮能夠**①降溫**、**②大範圍遮陽**。

2.根據本研究結果，行道樹**應該考慮****①樹高**、**②樹冠幅/樹寬**、**③樹冠側面積/樹冠面積**、**④樹蔭長年濃密/樹種**。由於樹蔭形成乃因為太陽平行光照射，而時間變化，太陽仰角隨之改變，樹蔭也會改變，故需再加入**⑤太陽仰角...等條件**。

3.如圖 6-10，我們希望規畫樹蔭能遮住整個路面寬(LW)，雖然樹幹亦會形成樹蔭，但影響的樹蔭寬的是樹冠高，遮住路面的樹蔭主要由樹冠部分形成，因此配合各個時間之太陽仰角找出能遮住整個路面的最佳植樹高度及公式，

最佳植樹公式為 $LH+W\tan \theta$

其中 W:要遮住的路寬

LH:樹木枝下高

θ :當地 12 點太陽仰角

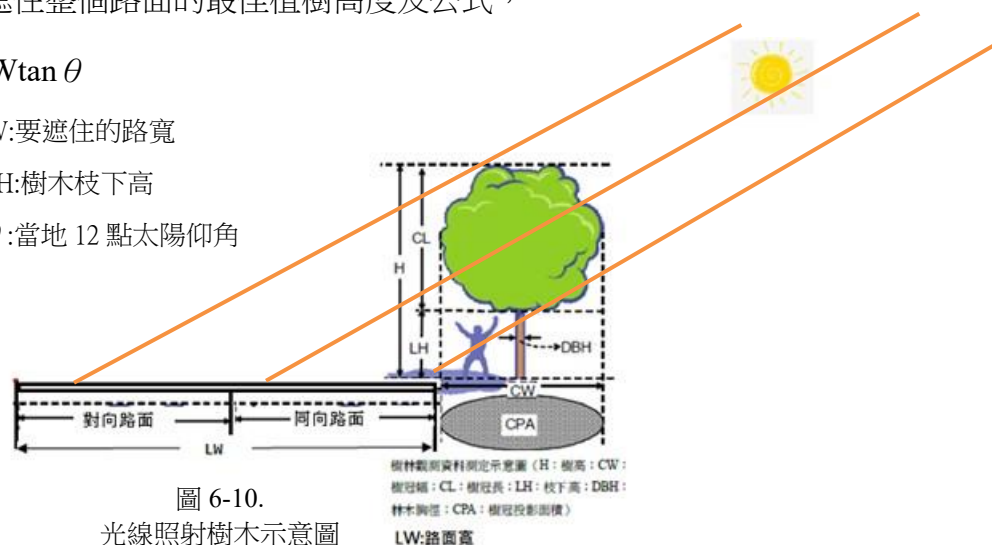


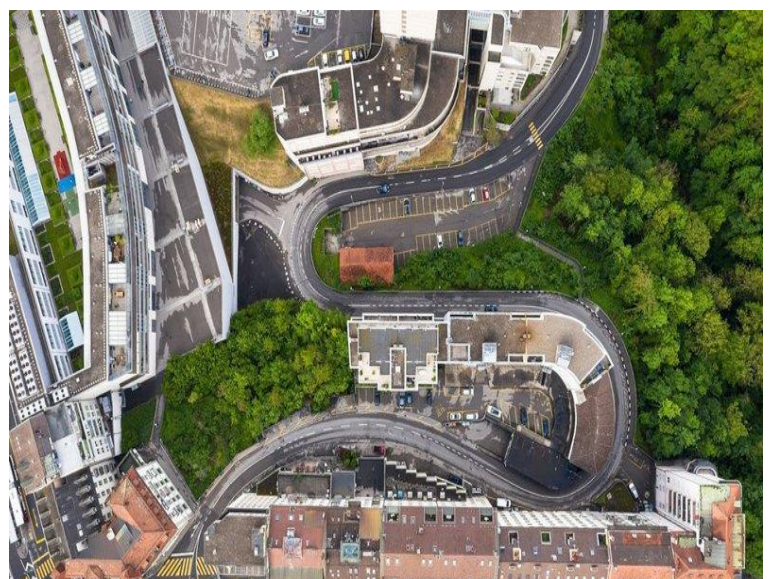
圖 6-10. 光線照射樹木示意圖

柒、結論

- 一、我們實地進行測量後得知，在春季，無樹蔭的室外環境與有濃密樹蔭的地方溫差高達 22.3°C ，濃密樹蔭下的氣溫是各種條件下最低，可見濃密樹蔭對於人類對自然環境舒適度需求之重要性，而濃密樹蔭來自大樹，因此「大樹群數量之多寡」影響氣溫甚多。
- 二、透過 NDVI 及綠覆率的統計得知，六都中，學校使用地上的大樹群比例是較低的，學校大樹群比例竟比都市地區或公園綠地低三倍多。雖然本地人均樹木分配數量最高，但樹木種植多集中在山區，因此若能在「人多地少的有限區域有效種樹」才是最佳策略。
- 三、除了美學上的效果，行道樹兼具隔音、清淨空氣、微氣候等作用，在不同樹種之行道樹間，樹高的大小不是決定樹冠側面面積的主要原因。
- 四、樹高相同時，樟樹是樹冠側面面積最大的，發現從外觀且對於希望有濃密樹蔭的行道樹選擇，加上整年樹葉長青，樟樹是最佳代表。
- 五、樹蔭並非由樹高決定，即樹越高，並非樹冠蔭就越大。遮住路面的樹蔭主要由樹冠形成，若配合各個時間之太陽仰角、路面寬度，以及最佳植樹公式為 $LH+W\tan\theta$ (單位:m)，其中 W:要遮住的路寬、LH:樹木枝下高、 θ :當地 12 點太陽仰角，可找出能遮住路面的最佳植樹高度。以炎熱的夏至時分為例，氣溫最高的 13~15 時行道樹栽種條件佳的樟樹，路面寬為 12~18m 時(遮到中央分隔島處)，行道樹宜在約 25m~37m 左右，可達到較佳的行車環境。

捌、應用

Google 於 2020/11/20 發表的文章—Google 成立樹冠實驗室 Tree Canopy Lab(該實驗正在協助洛杉磯達成植樹目標，計畫 2021 年種植並維護 9 萬棵樹)，但本研究初步已完成能規劃樹蔭的樹冠實驗室!協助推薦在高溫下的道路旁種植最佳行道樹，讓居民能幸福生



活，而非單純只依賴過去的綠覆率來規畫。

玖、參考資料

1. 互動版太陽路徑圖。 https://www.hko.gov.hk/tc/gts/astronomy/SunPathDay3_ue.htm
2. 外部效度 (External Validity)。維基百科。
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%96%E9%83%A8%E6%95%88%E5%BA%A6>
3. 李育琴(2018)。高雄綠地六都之首民團訴求要森林城市、提高綠覆率。環境資訊中心特約報導。取自 <https://e-info.org.tw/node/213800>。
4. 林莉萍、王正楷、曾義星、朱宏杰(2014)。應用空載光達資料估計森林樹冠高度模型及葉面積指數。航測及遙測學刊。19 卷 2 期 (2014 / 12 / 01), P107-123。
5. 林曉莉(2020)。Google 成立樹冠實驗室，以 AI 及航空照片來規畫樹蔭。
<https://www.ithome.com.tw/news/141224>
6. 〇市養工處(2013)。〇市行道樹導覽手冊。
7. 徐嘉君(2018)。探索神祕樹冠世界。科學少年，65 期。
<https://ys.ylib.com/UnitCont.aspx?ID=822>
8. 常態化差值植生指標。維基百科。
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%B8%B8%E6%85%8B%E5%8C%96%E5%B7%AE%E5%80%BC%E6%A4%8D%E7%94%9F%E6%8C%87%E6%A8%99>
9. 楊榮啟(2003)。森林測計學。國立編譯館，台南，第 23-52 頁，2003。
10. 蕭淳伊、曾義星(2009)。應用遙測影像與空載光達資料推估森林分佈面積及樹冠體積。航測及遙測學刊第十四卷第一期第 51-64 頁。
11. 臺灣地區重要針闊葉樹種立體像對判釋之研究成果報告書(2013)。
12. 臺北市新建建築物綠化實施規則(2015)。
13. 臺灣好植地計畫。 <https://sites.google.com/view/tree-taiwan/ndvi>。

附件一：

同地點多種行道樹樹冠特徵原始數據表

編號	樹冠高 (m)	枝下高 (m)	樹高 (m)	樹寬 (側) (m)	樹冠側面積(m ²)	樹冠面積(m ²)	平均樹冠幅(m)	樹冠蔭面積(m ²)	平均樹冠蔭幅(m)
落羽松 1	4.82	0.78	5.59	4.10	12.45	20.60	5.60	20.67	5.96
落羽松 2	2.82	1.71	4.52	4.66	6.84	14.20	5.34	6.03	3.96
土肉桂 1	2.38	1.11	3.48	2.48	4.43	6.47	3.06	8.55	3.65
土肉桂 2	2.43	1.25	3.67	3.22	5.23	10.61	4.05	7.92	3.75
土肉桂 3	3.98	1.67	5.65	6.23	17.12	33.19	7.06	23.23	5.97
樟樹 1	3.66	2.18	5.84	5.48	11.69	46.83	8.83	14.30	6.29
樟樹 2	5.01	1.33	6.33	6.36	19.26	80.54	10.75	22.42	6.89
棕欖 1	3.25	3.32	6.56	4.18	0.18	0.73	2.96	0.34	4.07
棕欖 2	4.41	3.36	7.76	4.58	0.14	0.87	3.44	0.26	4.72
棕欖 3	5.09	3.41	8.51	4.47	0.30	1.01	3.46	0.57	4.74

附件二：

同地點多種行道樹樹冠特徵數據分析表

編號	樹冠側面積	樹冠面積	每等高之樹冠側面積 樹高	平均樹冠蔭幅	樹冠蔭面積 樹冠側面積	樹冠蔭面積
	樹高	樹高		平均樹冠幅		樹冠面積
落羽松 1	3.69	2.23	0.7	1.07	1.66	1.00
落羽松 2	3.14	1.51	0.7	0.74	0.88	0.42
土肉桂 1	1.86	1.27	0.5	1.19	1.93	1.32
土肉桂 2	2.89	1.43	0.8	0.93	1.52	0.75
土肉桂 3	5.87	3.03	1.0	0.85	1.36	0.70
樟樹 1	8.02	2.00	1.4	0.71	1.22	0.31
樟樹 2	12.72	3.04	2.0	0.64	1.16	0.28
棕欖 1	0.11	0.03	0.0	1.37	1.88	0.46
棕欖 2	0.11	0.02	0.0	1.37	1.88	0.30
棕欖 3	0.12	0.04	0.0	1.37	1.88	0.57

附件三：節錄自臺灣地區重要針闊葉樹種立體像對判釋之研究成果報告書(2013)

植物隨生活史，於不同的階段有週期性的生物律動發生的時間，如植物抽芽、開花、落葉及結果的季節變化，主要為物種與氣候之間的關聯性，下表為樹種季節變化月份表。

樹種季節變化月份表

樹種	影像	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
千年桐	SCAN			花	花	花							
	DMC			花	花	花							
大葉桃花心木	SCAN				落	落							
	DMC				落	落							
	ADS40				落	落							

樟樹	SCAN		芽	芽									
	DMC		芽	芽									
	ADS40		芽	芽									

備註：芽=新芽；花=開花；果=結果；落=葉變色或落葉；灰色網底=有影像

附件四一

不同地點樟樹樹冠側拍、空拍特徵數據表

編號	樟樹樹冠側拍特徵數據					樟樹樹冠空拍特徵數據				
	樹高(m)	樹冠高(m)	樹寬(側)(m)	樹冠側面周長(m)	樹冠側面面積(m ²)	樹冠面積(m ²)	樹冠周長(m)	樹冠幅(直長)(m)	樹冠幅(橫寬)(m)	平均樹冠幅(m)
A 1	6.29	4.57	3.35	34.74	8.73	19.84	36.55	5.30	5.15	5.22
A 2	6.51	4.12	3.82	33.61	10.09	21.47	23.47	4.98	5.47	5.23
A 3	5.25	2.69	3.35	20.35	6.43	22.56	27.63	5.70	5.24	5.47
A 4	5.45	3.51	3.75	36.35	4.40	14.82	21.55	4.75	4.80	4.78
B 1	4.45	2.58	2.54	16.61	3.70	7.60	16.13	3.51	3.16	3.34
B 2	5.52	3.87	2.58	21.34	5.31	9.17	17.10	3.51	4.34	3.93
B 3	5.94	3.53	3.89	22.18	7.75	18.46	26.00	5.51	5.25	5.38
B 4	5.54	3.47	2.42	22.00	5.38	12.17	22.47	4.26	4.57	4.42
B 5	5.60	4.32	3.63	36.20	8.68	11.92	25.72	4.63	4.83	4.73
C 1	9.32	5.12	5.11	32.69	15.89	38.85	64.06	10.02	9.01	9.51
C 2	6.47	4.56	3.25	26.30	9.76	36.88	60.16	7.77	10.05	8.91
C 3	9.09	6.50	9.93	44.35	48.27	11.44	21.37	4.83	3.84	4.33
C 4	6.42	4.60	4.54	24.60	10.17	101.60	77.05	12.04	13.63	12.83
D 2	5.12	3.27	3.38	23.91	7.26	11.13	15.73	3.83	4.02	3.93
D 3	6.51	4.70	4.15	27.48	13.15	24.00	26.17	5.68	5.90	5.79
F 1	3.96	2.69	2.67	19.78	4.37	14.85	19.42	4.09	5.09	4.59
F 2	4.28	2.28	2.55	11.90	3.54	8.34	23.72	3.35	3.76	3.56
F 3	4.89	3.44	4.08	20.69	8.09	8.73	17.96	4.05	3.44	3.75
F 4	4.14	1.85	2.23	11.06	2.52	3.85	8.93	2.25	2.43	2.34
F 5	5.77	3.83	3.65	30.59	8.81	14.36	25.13	4.78	4.76	4.77
F 6	5.26	2.96	2.78	21.29	6.02	6.93	14.83	3.63	3.06	3.35
F 7	6.19	4.35	3.80	29.75	8.30	21.84	32.75	5.96	6.09	6.03
F 8	6.29	4.57	3.35	34.74	8.73	6.74	17.98	3.59	3.28	3.43
W1	3.58	2.01	2.80	14.62	3.52	11.53	17.01	3.72	4.51	4.11
W 2	3.59	1.86	2.16	14.57	2.28	7.10	13.83	3.02	3.47	3.24
W 3	4.82	3.02	3.68	16.64	6.21	15.01	20.17	5.13	4.92	5.02
W 4	3.49	1.87	1.35	9.82	1.70	3.04	10.65	2.71	1.66	2.18
W 5	4.31	2.64	3.85	22.11	6.65	24.42	28.73	6.55	6.38	6.46
W 6	6.51	4.45	3.98	31.14	11.24	25.10	32.00	6.55	6.12	6.34
W 7	5.86	3.41	3.17	11.51	5.07	17.25	20.86	4.90	5.14	5.02

附件五—

樹冠側面面積與樹冠面積相對樹冠長度乘積比值表

編號	A 1	A 2	A 3	A 4	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	C 1	平均 1
比值 1	0.57	0.64	0.71	0.33	0.57	0.53	0.56	0.64	0.55	0.61	0.60
比值 2	0.73	0.79	0.75	0.65	0.68	0.59	0.64	0.62	0.53	0.43	0.67
編號	C 2	C 3	C 4	D 2	D 3	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	
比值 1	0.66	0.75	0.49	0.66	0.68	0.61	0.61	0.58	0.61	0.63	
比值 2	0.46	0.61	0.62	0.72	0.72	0.70	0.66	0.62	0.71	0.63	
編號	F 6	F 7	F 8	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7	平均 2
比值 1	0.73	0.50	0.57	0.63	0.01	0.56	0.67	0.65	0.63	0.47	0.54
比值 2	0.62	0.60	0.57	0.68	0.67	0.59	0.64	0.58	0.63	0.69	0.72

備註:①平均 1(研究三(一)1 的兩棵樟樹平均數據)

②平均 2(30 棵樟樹數據進行平均)

③比值 1=樹冠側面面積/(樹冠高*樹寬)

④比值 2=樹冠面積/(平均樹冠幅*平均樹冠幅)

附件六—經緯度 22.623, 120.337 節氣 8 時~16 時太陽仰角

	8 時	9 時	10 時	11 時	12 時	13 時	14 時	15 時	16 時
春分	26.0	39.3	51.8	62.1	67.2	63.8	54.2	42.0	28.8
夏至	35.1	48.6	62.3	76.0	89.2	76.3	62.6	48.9	35.4
秋分	29.7	43.0	55.3	65.0	68.3	62.8	52.1	39.5	26.1
冬至	16.2	27.	35.9	41.9	43.9	41.5	35.1	26.0	15.2

備註:數據單位為 °

【評語】 032912

探討六都綠覆率情形，並利用空拍與結合圖形分析軟體，分析行道樹的結構與遮蔭效果，找出最有遮蔭效果的行道樹。研究中也結合模型驗證，作出預測的數學模型，是有創意且應用性高的研究。針對落羽松、土肉桂、樟樹、棕櫚樹等行道樹，運用 ImageJ 及 IC_Measure 程式軟體分析、計算樹冠、樹冠幅、樹冠幅蔭等面積，探討樹蔭大小和遮陽的關聯性，發現樟樹能提供較多樹蔭達降溫效果。建議如下：

1. 樹冠面積隨季節變化，須提供研究的時間區間。
2. 建議關注各縣市政府的行道樹植樹建議表，如近年樟樹因有樟白介殼蟲病蟲害嚴重，已列為暫不宜種植於人行道樹種。
3. 應用端可思考採用在極端氣候之後的災損分析。

作品簡報



從空中看地面

—用算樹實驗探討行道樹遮陽效果

科別：生活與應用科學科(二)(環保與民生)

組別：國中組

編號：032912

關鍵詞：遮陽效果、植樹規劃



前言

研究動機

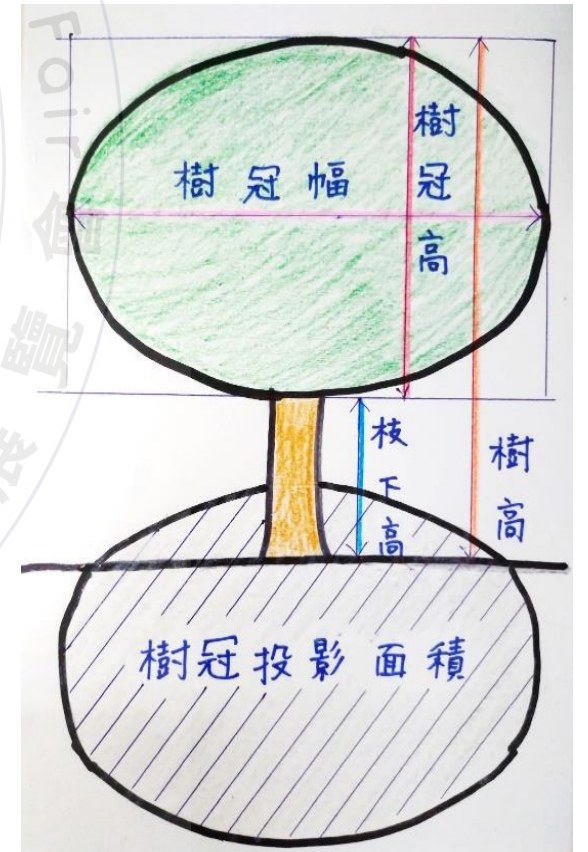
本研究利用多元科技工具與方法，以仿遙測法、電腦軟體分析計算，探討綠覆率情形及常見行道樹特徵，並進一步分析其數學量，如：形狀、面積、樹冠幅…等，藉此建立其與遮陽效果之關聯性，提供行道樹種植有效之最佳建議，並可減碳、改善地球暖化與熱島效應。

研究目的

- 一、探討樹木之遮陽效果。
- 二、運用NDVI數據調查並探討六都綠覆情形。
- 三、運用算樹實驗探討行道樹之樹木特徵與遮陽效果之關係。
 - (一)運用算樹實驗探討常見行道樹之樹木特徵。
 - (二)探討常見行道樹之樹木特徵和樹蔭面積之關係。

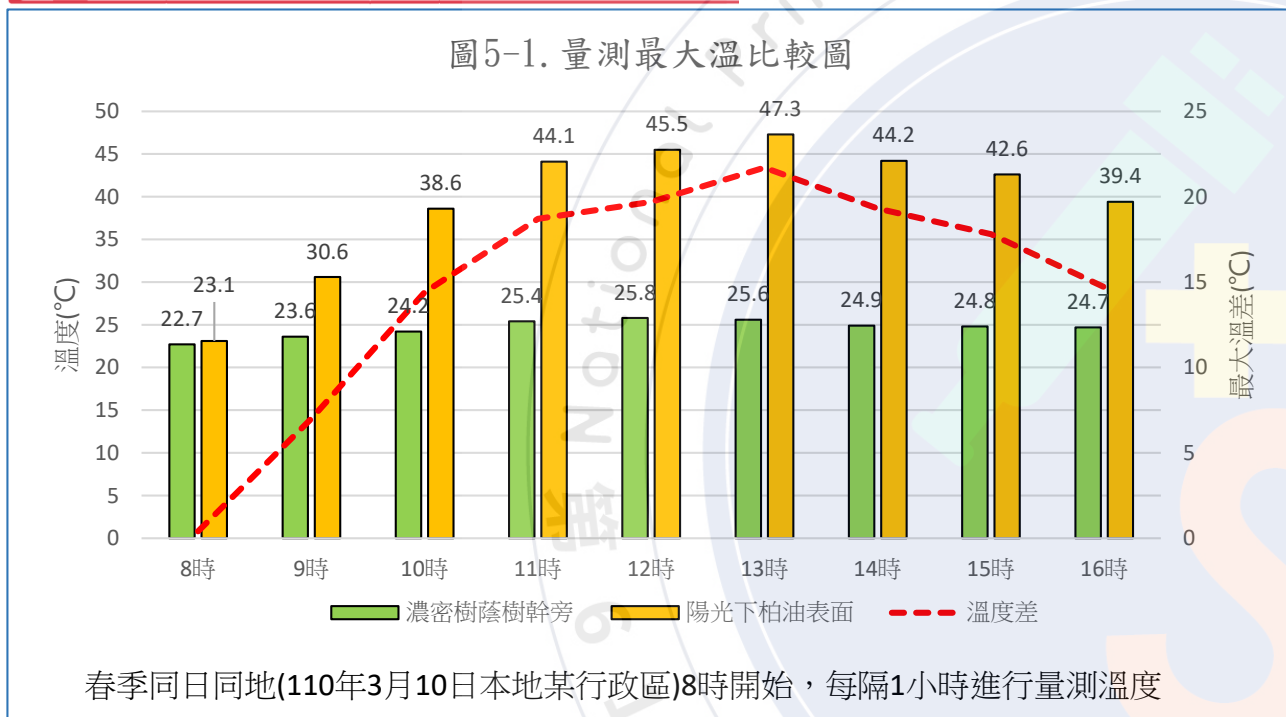
解釋名詞

- 綠覆率：指總綠覆面積與法定空地面積之百分比
- 常態化差值植生指標(NDVI)：
$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$
- 人均樹木分配數量：
$$\frac{\text{該地區所有樹木數量}}{\text{該地區人口數}}$$



研究過程與結果

一. 探討樹木之遮陽效果



1. 任何時間點之溫度：濃密樹蔭 < 非濃密樹蔭

< 陽光下。

特別是13時，陽光下：柏油路面溫度高達47.3°C，而樹幹旁則為36.9°C。

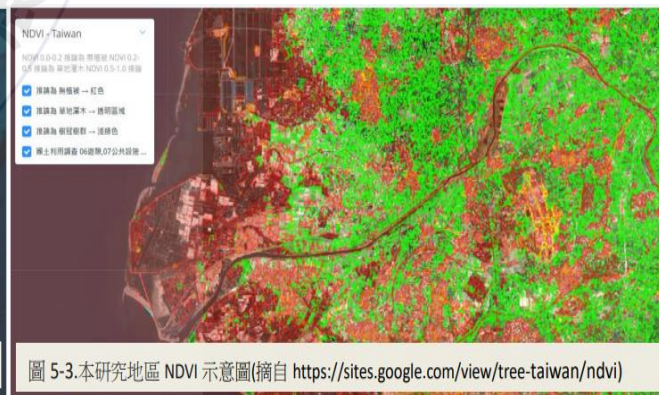
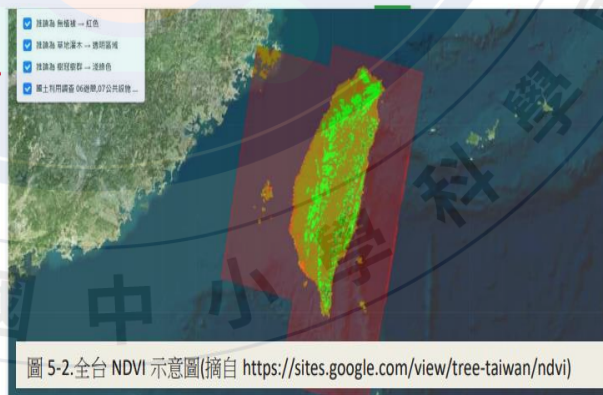
相對濃密樹蔭下：柏油路面溫度29.8°C，而幹旁為25.6°C，**溫差最高達21.7°C**。

2. 上午8時，所有地點的溫度都接近24°C，陽光下柏油路面溫度部分比有樹蔭的位置低，推測柏油路面仍在吸收陽光的熱量，尚未釋出熱量。

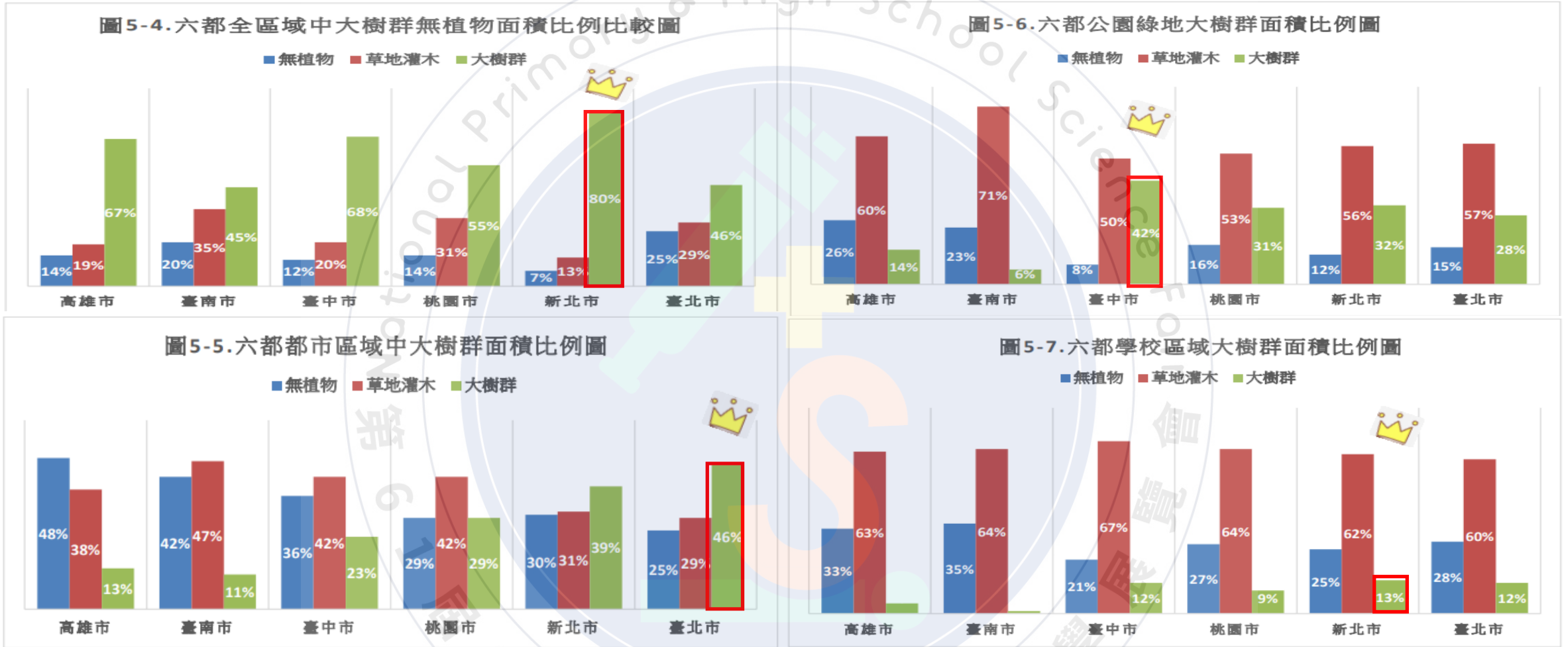
3. 隨時間推移，量測地點**溫度**不斷升高，12~14時達到巔峰，在**14-16時**氣溫**慢慢**下降，16時以後樹幹、土壤、柏油路溫度都比上午高一些。

二. 運用NDVI數據調查並探討六都綠覆情形

透過Landsat 8 衛星圖資 (解析度可達30公尺*30公尺) 所得到的綠覆率分布，其NDVI值：
0.0-0.2 (紅色區域) 推論為無植被。
0.2-0.5 (透明區域) 推論為草地灌木。
0.5-1.0 (淺綠色區域) 推論為樹冠樹群。



(一)累計至 2020 年六都 NDVI 量測各區域無植物、草地灌木、大樹群分布範圍。



1. NDVI顯示大樹群對六都面積比例，以新北市80%為六都之冠，其次為臺中市>高雄市>桃園市>台北市>台南市。
2. 六都中，學校用地的大樹群比例皆小於15%，均遠低於都市地區或公園綠地。可見學校種植的大型樹木皆太少，學習環境中樹太少是值得關注與需要解決的重要問題。

(二)至 2020 年由 NDVI 推論六都目前各有多少棵樹

仿「台灣好植地」之內容，以『假設有綠覆之面積時，每 1 平方公尺會有 1 棵樹』為前提，推論六都目前各有多少棵樹，推算「人均樹木分配數量」。

表 5-2.六都人均樹木分配數量表

縣市	縣市面積(km ²)	NDVI>0.5 面積比例	NDVI>0.5 面積 (km ²)	樹量(棵)	人口(人)	人均樹木分配 數量(棵)
高雄市	2,952	0.67	1978	1977741108	2763057	716
臺南市	2,192	0.45	986	986243895	2642877	373
臺中市	2,215	0.68	1506	1506129824	2821464	534
桃園市	1,221	0.55	672	671524700	2268807	296
新北市	2,053	0.80	1642	1642053360	4029493	408
臺北市	272	0.46	1252	125027862	2602418	48

人均樹木分配數量最高的高市市民很難感受自己被700多棵樹圍繞的幸福，能夠在「**人多地少的有限區域有效種樹**」才是最佳策略。

三、運用算樹實驗探討行道樹之樹木特徵與遮陽效果之關係

電腦軟體處理分析流程為：

步驟①依據相機與空拍機所拍攝下的各個樹種側面圖及空拍圖，進行測量樹高、樹冠高，樹冠幅、樹冠及樹冠蔭之面積及周長。

步驟②利用 IC Measure 及 Image J 的電腦軟體，量測出圖形上的各種所需的數據資料。

步驟③進行比例尺的計算轉換，推算出各種樹種之樹冠資料的實際數據。

(圖片上的長度：實際長度 = 圖片上的樹冠數據：實際的樹冠數據)

其中平均樹冠幅乃利用 Image J 內建及自行設計之程式，分析所有樹冠每一段長度進行平均。

步驟④但經分析後樹冠幅長短落差甚大，故『配合 Image J 內建及自行設計之程式，分析所有樹冠每一段長度進行平均，稱之為平均樹冠幅』

過程中照片面積或長度相關數據分析部分，為求高有效度，分別使用上述不同軟體進行處理，得到多個分析之數據後進行平均，獲得最後數據。

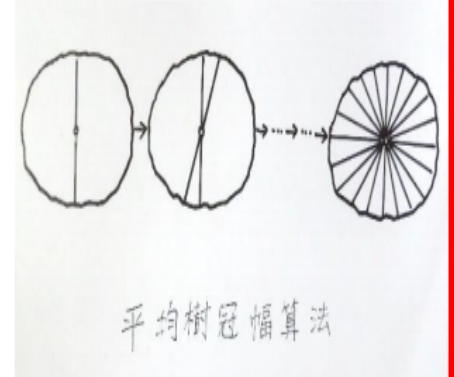
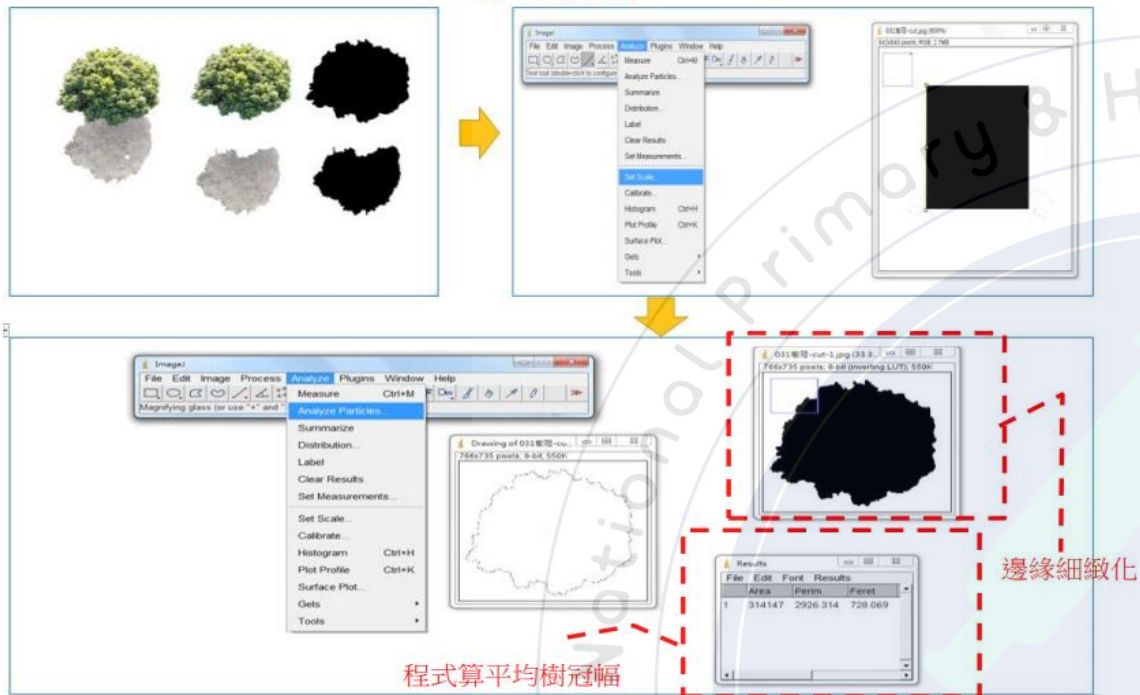
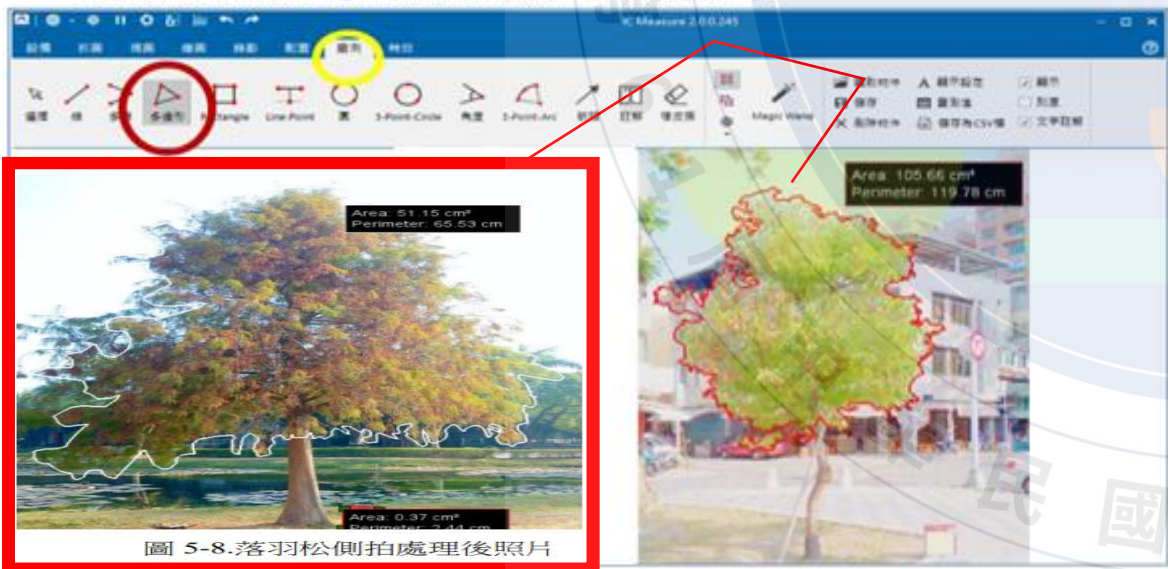


Image J 操作過程：



並輔以 IC Measure 電腦軟體處理照片，操作流程如下：



(一)運用算樹實驗探討常見行道樹之樹木特徵

表 5-3.某都會公園樹木外觀特徵分析表

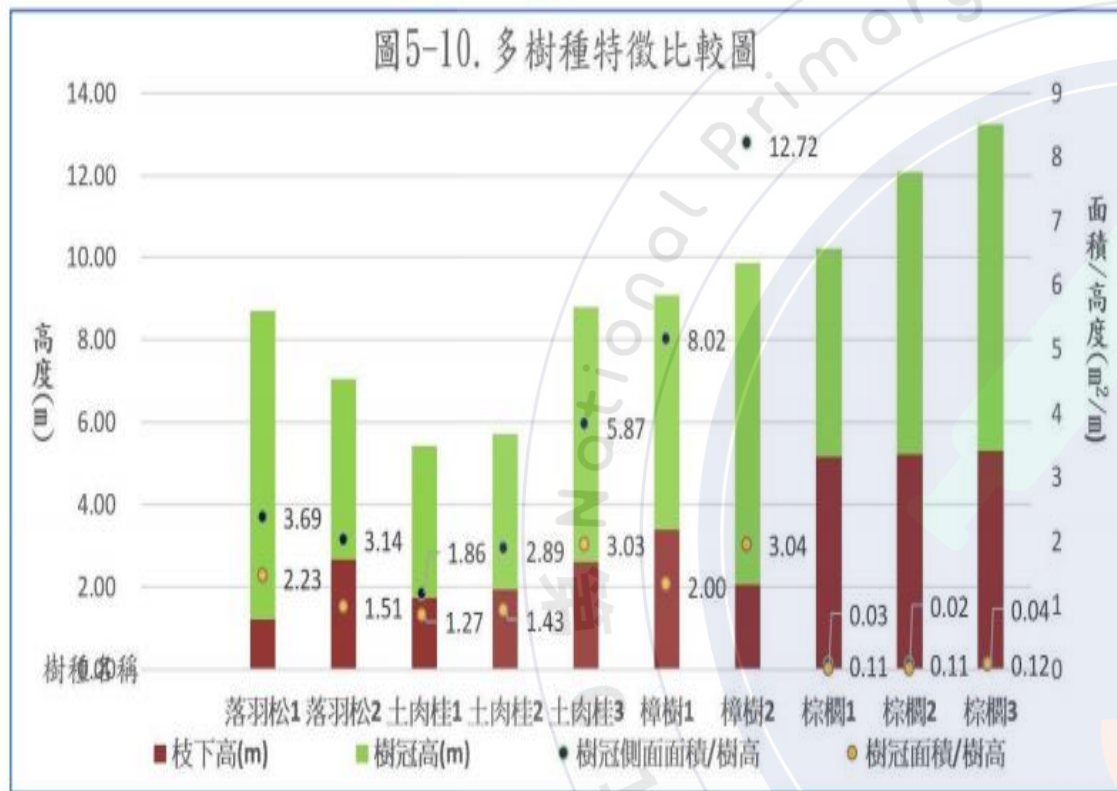
樹種	樹冠輪廓	樹冠邊緣	樹冠表面	樹冠數量
落羽松 1	心形	鈍鋸齒	連續	單冠
落羽松 2	不規則形	鈍鋸齒	非連續	多冠
土肉桂 1	圓形	纖毛狀	連續	單冠
土肉桂 2	盾形	纖毛狀	連續	單冠
土肉桂 3	圓形	纖毛狀	連續	單冠
樟樹 1	不規則形	鈍鋸齒	連續	多冠
樟樹 2	圓形	纖毛狀	連續	多冠
棕欖 1	圓形	裂緣	非連續	單冠
棕欖 2	圓形	裂緣	非連續	單冠
棕欖 3	圓形	裂緣	非連續	單冠

- 備註：①樹冠輪廓中圓形為○，不規則形為●，
 ②樹冠邊緣分成全緣為●、鈍鋸齒緣●、裂緣✱、纖毛狀●
 ③樹冠表面可分成連續●、非連續●
 ④樹冠數量可分成單冠🌳及多冠🌳，此乃側視圖示。

表 5-4.多種行道樹樹冠側拍空拍照片整理表

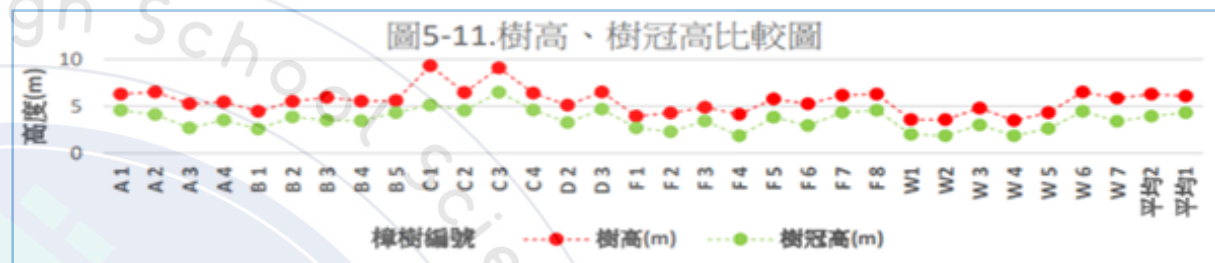
樹種	樹冠側拍			樹冠空拍	
	原圖	樹高/樹寬分析	面積分析	原圖	處理後圖
落羽松 1					
土肉桂 3					
樟樹 1					
棕欖樹 1					

針對樹冠高、枝下高、 $\frac{\text{樹冠側面面積}}{\text{樹高}}$ 、 $\frac{\text{樹冠面積}}{\text{樹高}}$ 繪製成多樹種特徵比較圖(圖 5-10)如下：

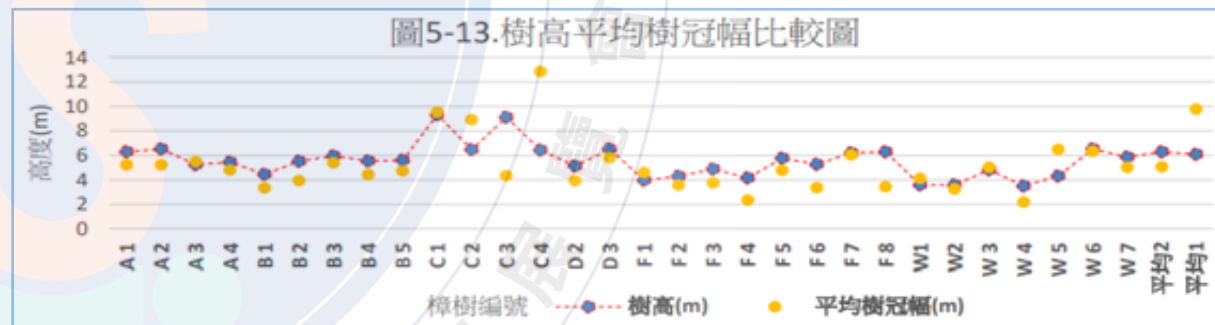
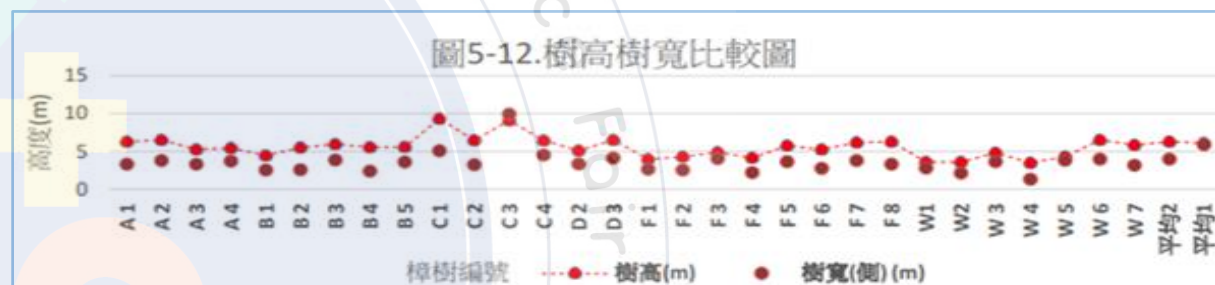


1. 棕櫚樹雖高但樹冠側面面積卻很小，可推斷**樹高不是決定樹冠側面面積、樹冠面積的主要原因**。
2. 樟樹不是最高，但樹冠側面面積/樹高之比值相對於樹高卻是較高的；而從樹冠面積/樹高之比值也雷同。顯見**樟樹遮陽效果相對較好**。

(二)運用算樹實驗探討樟樹之樹木特徵



樹高、樹冠高的趨勢幾乎相似，**樹高越高、樹冠高越高**。



由上面兩個圖可知，

1. **樹高、樹寬的趨勢大致一致，樹高越高、樹寬越大、平均樹冠幅亦越大**。
2. 部分樹高樹寬趨勢不一致(圖5-12)或部分樹高平均樹冠幅趨勢變化較大(圖5-13)的樟樹，推測可能因為生長時樹距不足或修剪造成。

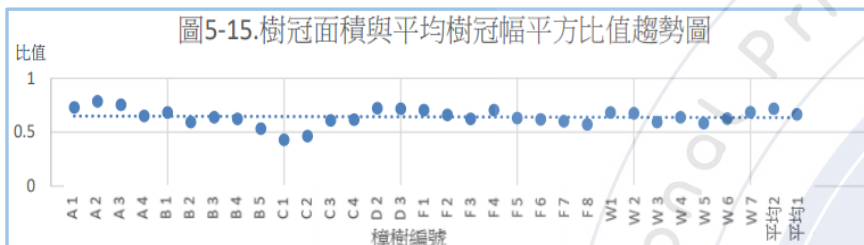
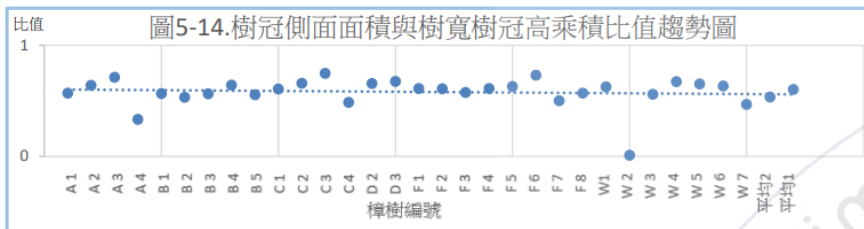
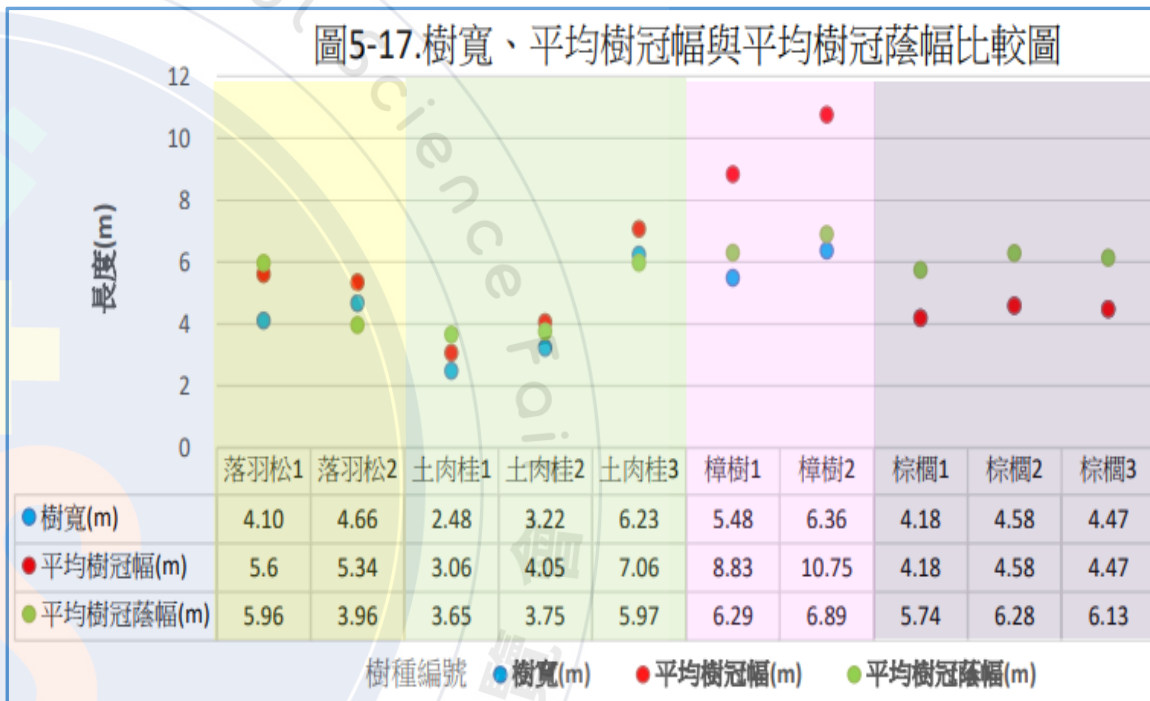


表 5-6 樹冠面積、平均樹冠幅平方與樹冠面積、平均樹冠幅平方比值迴歸分析表

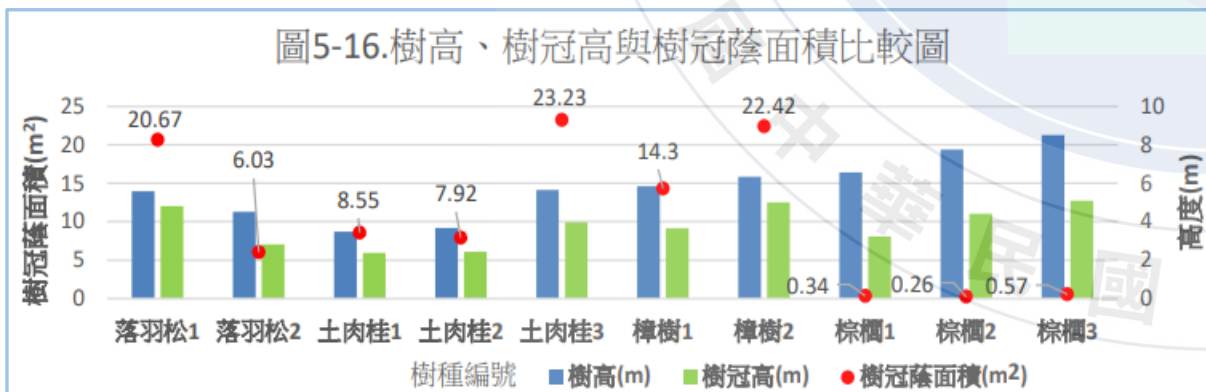
迴歸統計	
R 的倍數	0.86675274
R 平方	0.75126031
調整的 R 平方	0.73410585
標準誤	0.03920279
觀察值個數	32

由圖5-16得知，**樹越高或樹冠高越高，樹冠蔭面積並沒有越大**，如棕櫚樹；此結果和樹冠面積、樹冠側面積對比於樹高、樹冠高的結果雷同。

1. 由上面兩圖，這些比值會趨近於一定值(趨勢線)，可見相同物種的樟樹族群特徵應該會相似。推論樹木之間或許外觀不盡相同，但同種樹木卻有相似之特徵。
2. 由表5-6中可知，「樹冠面積與平均樹冠幅平方比值」和「樹冠面積、平均樹冠幅平方」的**相關係數約為0.867**，**決定係數為.734(觀察數值32個)**，代表此值有相當的解釋力。

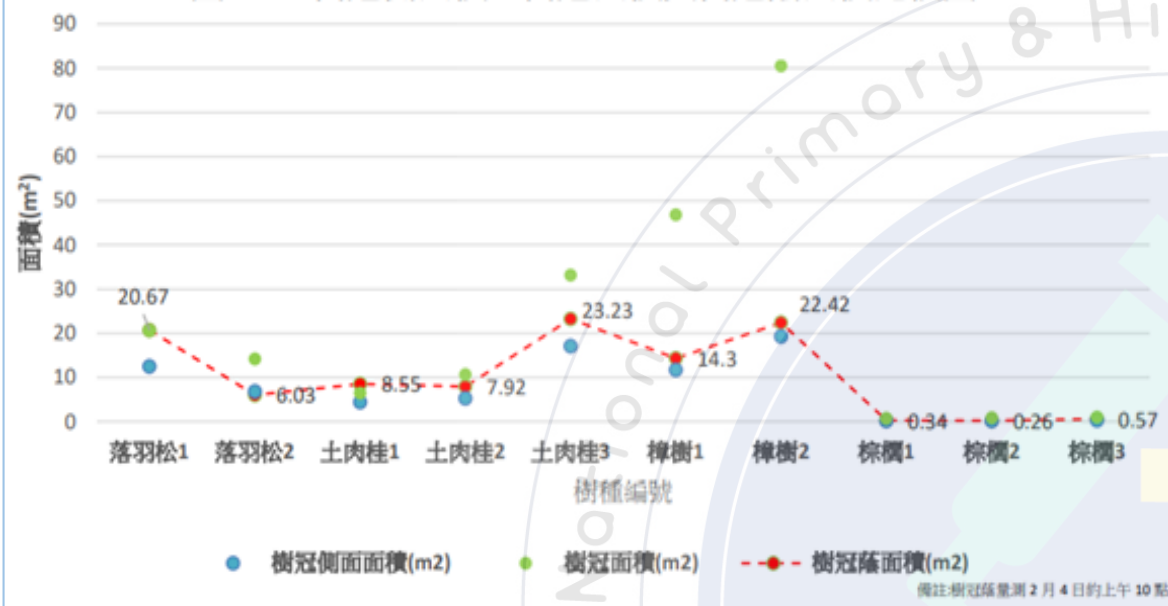


(三) 探討常見行道樹之樹木特徵和和樹蔭面積之關係



1. 由圖5-17得知，幾乎所有樹種的平均樹冠蔭幅和平均樹冠幅的趨勢一致，呈現正相關。亦即**若要取得樹冠蔭幅大小，只要知道樹冠幅即可**。
2. 從圖5-17色塊與圖中對應數據可以發現當樹寬、平均樹冠幅、平均樹冠蔭幅趨勢分布不同，這可能是樹種不同、外形特徵不同造成的。或許將來有機會可以進一步調查或實驗「種植同一物種的植物所花的時間和遮陽效果比較、樹木特徵之關聯性」。

圖5-18. 樹冠側面積、樹冠面積與樹冠蔭面積比較圖

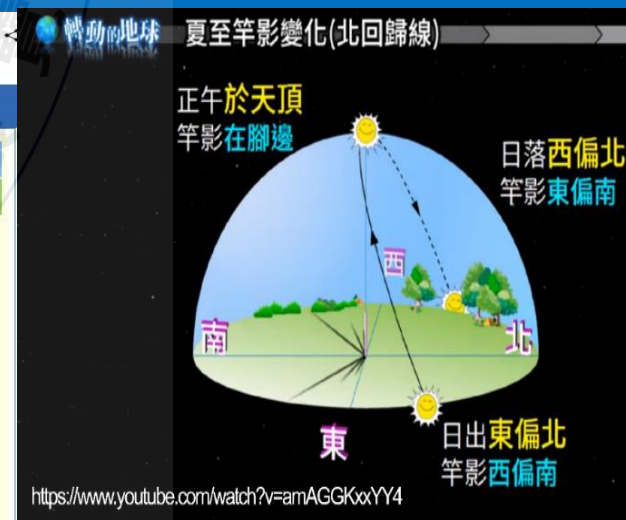


1. 幾乎所有樹種的樹冠蔭面積和樹冠側面積的趨勢一致，呈現正相關；若要取得樹冠蔭面積大小，只要知道樹冠側面積，佐以樹冠面積即可推知樹冠蔭面積，但以樹冠側面積為主。
2. 附件二分析表得知
 - (1) 樹冠側面積/樹高值越大，樹冠蔭面積越大。
 - (2) 樹冠面積/樹高值越大，樹冠蔭面積越大。
 - (3) 樹冠面積/樹冠高值越大，樹冠蔭面積越大。
3. 綜合以上結果得知，**樟樹**相較於其他樹種，無落葉季節，擁有大的樹冠面積能達到遮陽效果，適合作為行道樹的選擇。

討論——樹蔭規劃及行道樹植樹規劃結果

以當時研究的地點——某都會公園(利用google定位算出該地點之經緯度22.623, 120.337)為定位點，算出太陽仰角。

以2月3日9:50為例，太陽仰角為 37.6° ，整理該地(經緯度22.623, 120.337) 8時~16時四個主要節氣之太陽仰角。



一、自製道具、設計程式、拍攝影片，模擬不同時期、不同時間模擬北迴歸線位置樹影變化



圖 6-3 夏至東西向 9 點樹蔭模擬圖

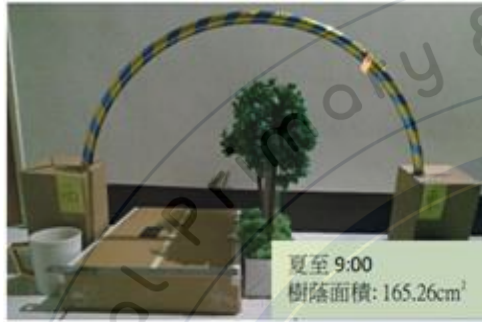


圖 6-5 夏至南北向 9 點樹蔭模擬圖

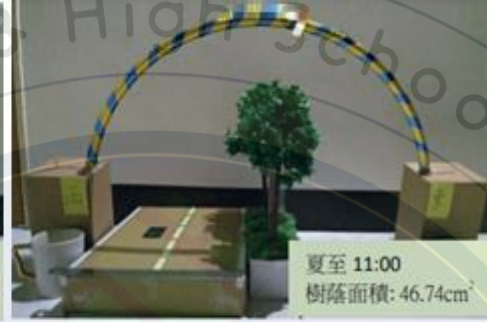


圖 6-7 夏至南北向 11 點樹蔭模擬圖



圖 6-4 夏至東西向 12 點樹蔭模擬圖



圖 6-6 夏至南北向 10 點樹蔭模擬圖

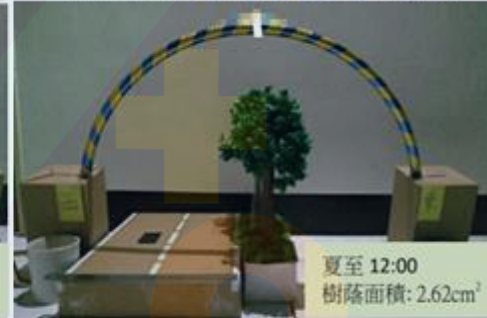
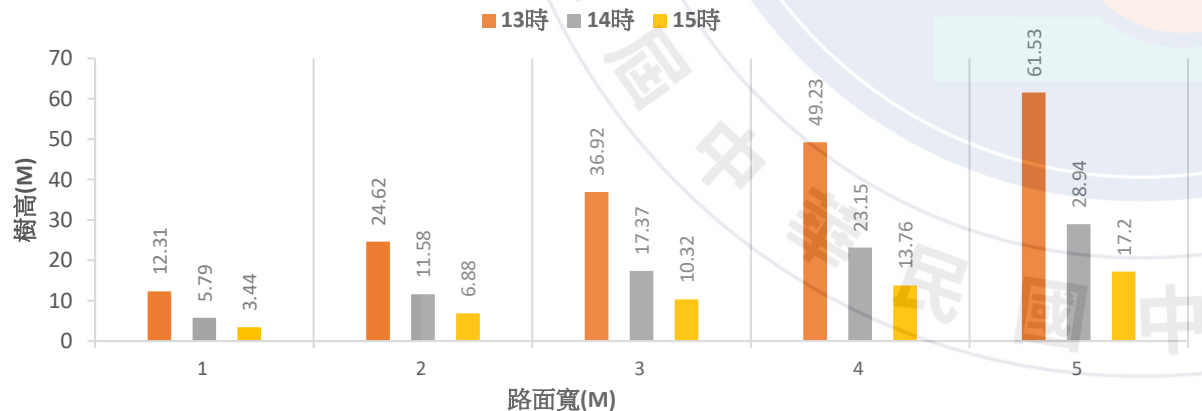


圖 6-8 夏至南北向 12 點樹蔭模擬圖

1. 夏至時期不管何時東西向道路的樹蔭遮陽效果不佳(遮不到道路路面)。
2. 經實際模擬南北向單棵仿樟樹
樹冠高為 14.1cm
樹冠寬為 13.8cm
樹冠面積為 187.45cm²，
在 9~12 時之間
 - ① 2.62cm² ≤ 樹冠蔭面積範圍 ≤ 165.26cm²
 - ② 0.20cm ≤ 樹冠蔭高範圍 ≤ 12.43cm
 - ③ 0.19cm ≤ 樹冠蔭寬範圍 ≤ 12.19cm

二、根據道路規則，探討不同路寬道路，在不同時間需要的樹高為何？

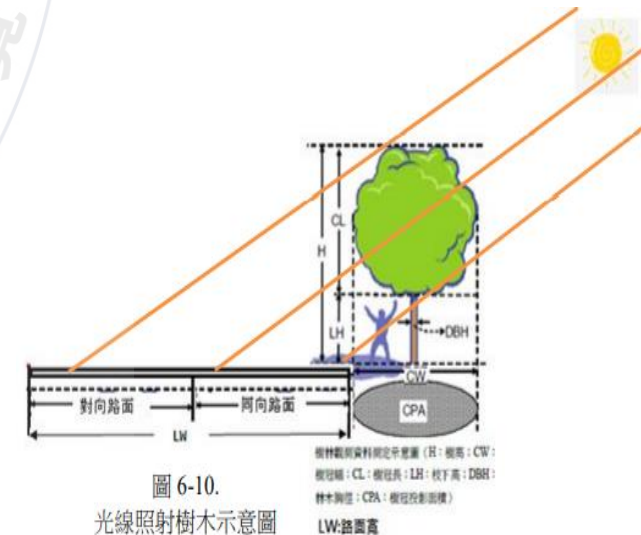
不同路面寬13、14、15時之樹高圖



1. 在夏至12時讓樹蔭遮住6m寬道路需要214.85m樹高的樹木。
13時樹蔭遮住6m寬道路需要12.31m樹高的樹木。
2. 以樟樹為例，在13時能遮蓋路面的所需樹高為最大值，在此提供修剪樹高的最低高度。
大多數路寬為12~18m，亦即行道樹的樹冠頂高24.62~36.92 m左右，可使用路人獲得較舒適的行車環境。

結論

- 實地進行測量後得知，在春季，無樹蔭的室外環境與有濃密樹蔭的地方溫差高達**21.7 °C**，濃密樹蔭下的氣溫是各種條件下最低，可見濃密樹蔭對於人類對自然環境舒適度需求之重要性，濃密樹蔭來自大樹，「**大樹群數量之多寡**」影響氣溫甚多。
- 透過NDVI及綠覆率的統計得知，六都中，學校用地上的大樹群比例皆低於15%，學校大樹群比例竟比都市地區或公園綠地低三倍多。雖然本地人均樹木分配數量最高，但樹木種植多集中在山區，因此若能在「**人多地少的有限區域有效種樹**」才是最佳策略。
- 除了美學上的效果，行道樹兼具隔音、清淨空氣、微氣候等作用，在不同樹種之行道樹間，**樹高的大小不是決定樹冠側面面積的主要原因**。
- 樹高相同時，樟樹是樹冠側面面積最大的，發現從**外觀**且對於希望有**濃密樹蔭**的行道樹選擇，加上**整年樹葉長青**，**樟樹**是最佳代表。
- 樹蔭並非由樹高決定，即樹越高，並非樹冠蔭就越大。遮住路面的樹蔭主要由樹冠形成，若配合各個時間之太陽仰角、路面寬度，**最佳植樹公式為 $LH+W\tan\theta$** (單位:m)，其中**W**:要遮住的路寬、**LH**:樹木枝下高、 **θ** :當地12點太陽仰角，可找出能遮住路面的最佳植樹高度。以夏至時分為例，氣溫最高的13~15時行道樹栽種條件佳的樟樹，路面寬為12~18m時(遮到中央分隔島處)，行道樹宜在約25m~37m左右，可達到較佳的行車環境。



應用

Google成立樹冠實驗室Tree Canopy Lab(2020/11/20發表文章，該實驗正在協助洛杉磯達成植樹目標)，本研究初步已**完成能規劃樹蔭的樹冠實驗室!**協助推薦在高溫下的道路旁種植最佳行道樹，讓居民能幸福生活，而非單純只依賴過去的綠覆率來規劃。



Analyzing data from different common species of street trees in Taiwan

Abstract

This research uses a variety of scientific and technological methods to study the planning of street trees. First, we explored the tree planting situation in six cities in Taiwan through NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). In order to analyze data on different species of street trees in Taiwan, a drone takes pictures of common species of street trees in Taiwan. Then, ImageJ and IC_Measure are used to analyze and calculate the crown width, crown area, and crown projection area. We went on to explore the relationship between shade area and shading from the sun. We found that because camphor trees can provide more shade and better cooling effect, it is the best choice for planting street trees in Taiwan. Finally, we made actual props to simulate experiments by ourselves, and found the best tree height can be found be $LH + W \tan \theta$ (unit: meters), where W is the width of the road, LH is the clear length of the tree, and θ is the local angle of elevation of the sun at midday. From the analysis, we can calculate the shade area at different times according to the angle of elevation of the sun of each region, and systematically plan the most suitable tree height in each region. For example, the minimum tree height is about 12 meters next to the 6-meter-wide road at the Tropic of Cancer.

參考資料

- 互動版太陽路徑圖。 https://www.hko.gov.hk/tc/gts/astronomy/SunPathDay3_ue.html
- 林莉萍、王正楷、曾義星、朱宏杰(2014)。應用空載光達資料估計森林樹冠高度模型及葉面積指數。航測及遙測學刊。19(2), P107-123。
- 〇市養工處(2013)。〇市行道樹導覽手冊。
- 常態化差值植生指標。維基百科。
- <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%B8%B8%E6%85%8B%E5%8C%96%E5%B7%AE%E5%80%BC%E6%A4%8D%E7%94%9F%E6%8C%87%E6%A8%99>
- 楊榮啟(2003)。森林測計學。國立編譯館，台南，第23-52頁，2003。
- 臺灣地區重要針闊葉樹種立體像對判釋之研究成果報告書(2013)。
- 臺灣好植地計畫。 <https://sites.google.com/view/tree-taiwan/ndvi>

目前研究者已寫信給Google 領導樹冠實驗室的Ruth Alcantara 女士，提供研究結果及摘要，期待google回信

