

第三章 佛羅里達大學農工系及農業灌溉課程

3-1 佛羅里達大學農工系及遙測中心介紹

本計劃之研習地點為佛羅里達大學農業及生物工程學系 (Department of Agricultural & Biological Engineering, University of Florida) 之遙感探測中心 (Center for Remote Sensing)。

農業及生物工程學系位於佛羅里達大學校園之 Frazier Rogers Hall，教職員約三十餘人，本系成立於 1923 年，旨在培養有關農業、生物、土壤與水資源相關之工程應用、科學、及管理原理之專業人才，並專注於這領域之研究與知識傳承及相關應用之推廣。



遙測中心成立於 1998 年，在施孫富教授奔走下，由國際灌溉排水協會中華民國國家委員會 (Chinese Taipei Committee, International Commission on Irrigation and Drainage, Taipei, R.O.C.) 和佛羅里達大學共同成立遙測應用基金於美國佛羅里達大學，並定名為中華民國基金 (The Taiwan R.O.C. Fund)，其宗旨在透過遙測及相關技術之研究與應用，促進佛州農產與自然資源保存。遙測中心研究之範疇包含了最先進之遙測技術 (remote sensing)、地理資訊系統 (GIS)、全球定位系統科技 (GPS) 於水資源、農業、自然資源方面之運用。其研究有賴各學科知識高度整合，例如可見光、紅外線遙測，光譜分析用於地表覆

蓋或植被、或水文變化之分析，或產生作物產量圖、或環境監控，微波遙測可用於了解土水動態，如蒸發散之觀測，以提研究模式高預測能力。遙測中心也同時運用了地表觀測、航空觀測、衛星觀測之方式，並透過田間實驗進行相關研究之驗證。

農業及生物工程學系、遙測中心之相關照片如下：



圖 3-1 與遙測中心主任 Dr. Jasmeet Judge 相見歡



圖 3-2 遙測中心—施孫富教授及歷屆研習學員照片



圖 3-3 研習教室



圖 3-4 電腦教室



圖 3-5 農業及生物工程學系

3-2 佛羅里達州灌溉系統

(註：參考資料：A.G. Smajstrla and D.Z. Haman. 2005. Irrigated Acreage in Florida : A Summary through 1998, IFAS Cir.1220. Univ of Fla)

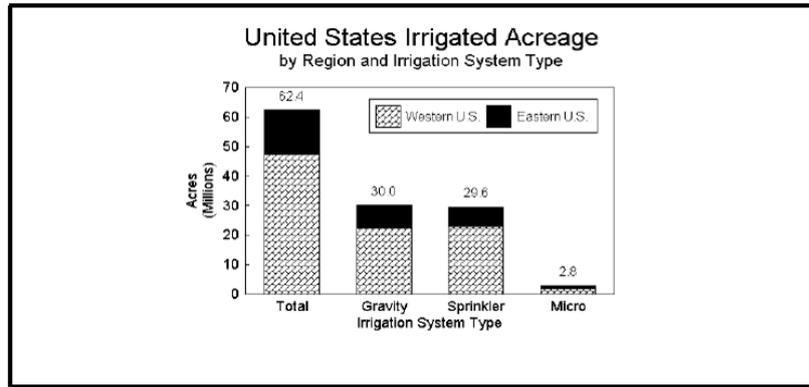
佛羅里達州氣候潮濕，年平均雨量介於 45 到 60 吋之間，但因土壤多砂土，又降雨分布不均，故土壤水分不足，大部份農地均有賴灌溉供水栽作。佛羅里達州也種植相當多高價值作物，帶來許多經濟效益。此外，灌溉系統業廣泛用於環境修正方面之應用，例如防止霜害凍害。

依據供水方式可將農業灌溉系統分成主要四類：噴灌 (sprinkler)、微灌 (micro)、地表漫灌 (surface)、地下水灌溉 (seepage(subirrigation)) 等類。若依 Irrigation Journal 調查文獻的分類，則可將灌溉系統分成 sprinkler、low-flow(microirrigation)、surface/gravity(包含 seepage 與 subirrigation)，因該期刊未列出 surface 與 seepage 灌溉方式，故將該二種方式歸類為 gravity-flow 系統。

依上述分類，灌溉方式可分成三類：gravity irrigation、sprinkler system、micro-irrigation 三類，將在 3-2-4 節分別說明。

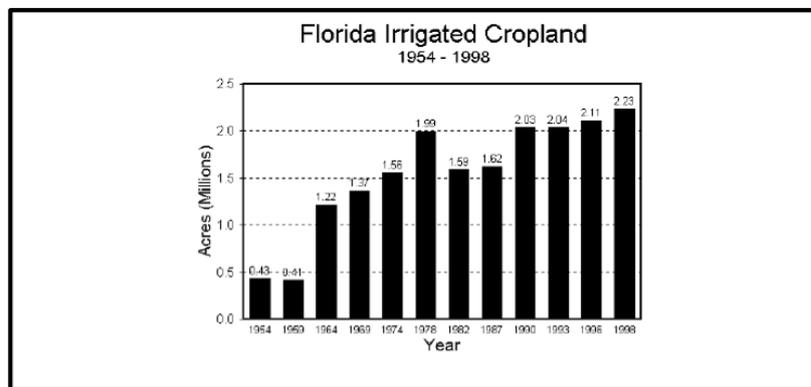
3-2-1 美國的灌溉地

全美灌溉地共計約 62.4 百萬畝，其中乾燥及半乾燥的西部地區(佔 75%)較相對潮濕的東部地區(佔 24.2%)有更多灌溉地。全美約有 30.0 百萬畝灌溉地使用 gravity irrigation system(約佔全美 48.1%)，約 29.6 百萬畝灌溉地採 sprinkler irrigation system(約佔全美 47.4%)，約 2.8 百萬畝灌溉地使用 micro irrigation system(約佔全美 4.5%)。



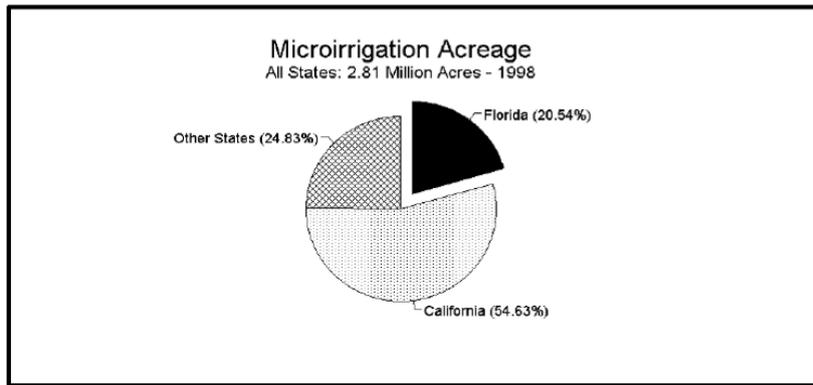
3-2-2 佛羅里達州的灌溉地概況

依據美國政府就 1954-1987 年所做的普查報告，及 Irrigation Journal 就 1990-1998 年作的文獻調查報告，佛羅里達州於 1954 年灌溉地約 0.43 百萬畝，至 1998 年則增加至約 2.23 百萬畝，其中除 1978-1982 年的調查統計結果歸因於經歷嚴峻寒害與石油成本提高造成灌地減少外，其餘年度可看出佛羅里達州的灌溉地逐年增加。



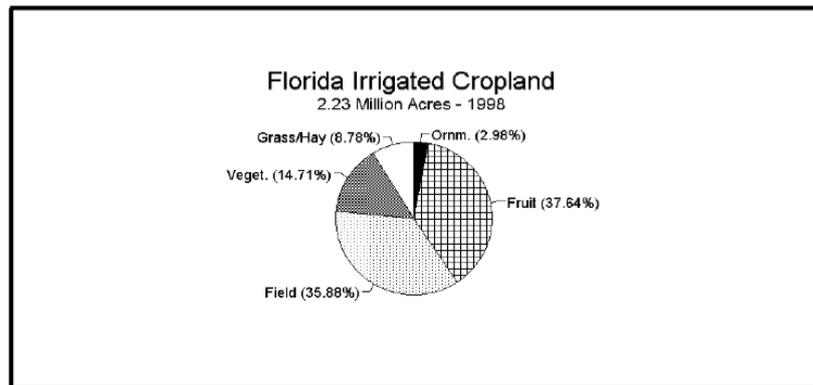
佛羅里達州的灌溉地總數(2.23 百萬畝)約在全美排第 9 位，其中屬於 gravity-flow (surface and seepage) irrigation system 灌溉地約 0.98 百萬畝排行全國第 10 位，sprinkler system 灌溉地約 0.68 百萬畝排行全美第 11 位，microirrigation system 灌溉地約 0.578 百萬畝排行全美第 2 位。

佛羅里達州的 microirrigation system 佔全美約 20%(佔美國東部地區約 61%)，因此亦為該州灌溉方式的一大特色。



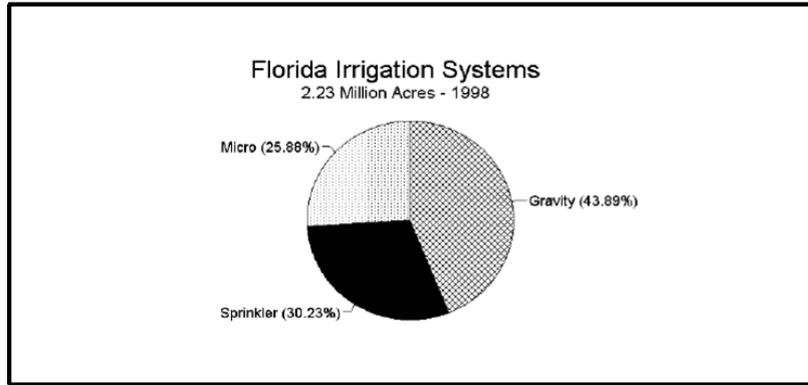
3-2-3 佛羅里達州的作物類型

佛羅里達州的作物類型主要分為果樹(37.6%)，田間作物(35.9%)，蔬菜類(14.7%)、牧草(8.8%)、與觀賞植物(3%)。其中果樹類又以柑橘站最大宗，柑橘約佔果樹 99.7%。



3-2-4 佛羅里達州的灌溉系統型態

佛羅里達州的灌溉地約 2.23 百萬畝，其中佔最大部份之灌溉方式為 gravity-flow(seepage & surface) irrigation system，約佔 43.89%，其次，sprinkler system 灌溉方式約佔 30.23%，另外 microirrigation system 佔 25.88%。

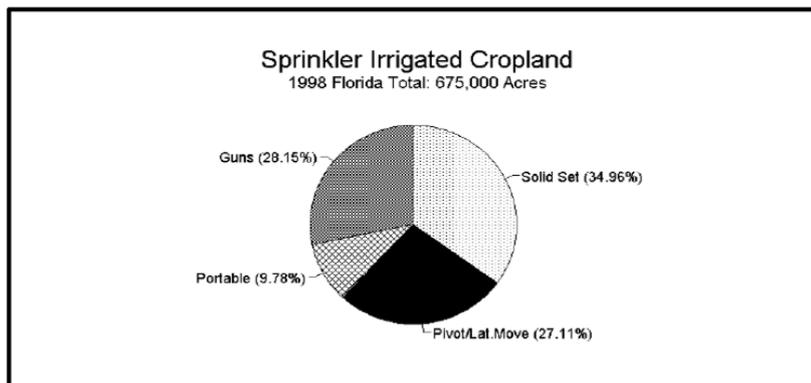


一、gravity-flow(seepage & surface) irrigation system :

佛州 gravity-flow 灌溉地主要採用 seepage 方式，採此法灌溉耕種之作物，主要為甘蔗與蔬菜。而 surface 除用於米與柑橘灌溉外，很少用於其他作物。

二、sprinkler system :

此類又可細分成 solid set(主用於柑橘、果類)、center pivot & lateral move (主要用於田間作物、牧草等)、portable(用於多樣性的農作)、guns(亦用於多樣作物)。在佛羅里達州，噴灌系統應用之比例分別為：solid set 佔約 34.96%、center pivot & lateral move 佔約 27.11%、portable 佔約 9.78%、guns 佔約 28.15%。



三、Micro-irrigation system :

大多數 Micro-irrigation 灌溉地為柑橘園，用於柑橘微噴灌溉與防止凍害。部分果樹也採用微噴頭灌溉，其他如蔬菜等也有採用滴灌方式者。

3-2-5 農場現地見習

本班課程之一安排赴佛羅里達大學試驗農場（Pine Acres）進行田野教學，由農業及生物工程學系研究人員解說並帶領參觀各種灌溉系統與實驗器具。

美國農場廣大，大面積種植方式下，常見 Big Gun、Liner Pivot 與 Central Pivot 為主要的灌溉方式，這些灌溉機具亦可以經由程式控制自動噴灌，以減少人力的浪費。台灣農田生產環境不同於美國之粗放方式，因此本班學員均為第一次看到此類大型灌溉設施。相關參訪照片如下：



圖 3-6 噴灌器具—Big Gun



圖 3-7 噴灌器具—Big Gun



圖 3-8 噴灌器具—Liner Pivot



圖 3-9 Liner Pivot 灑水噴嘴



圖 3-10 Pine Acres 農場灌溉農機具



圖 3-11 Pine Acres 農場灌溉機具



圖 3-12 研習學員與 Pine Acres 農場解說人員合影

3-3 精準農業

精準農業又可稱為特定地點農耕(site-specific farming)，為一項基於農田網格間之差異所衍生而出的農耕概念與方式，精準農業使用了新興科技如 GPS 定位系統、探測器、衛星或航拍影像、資訊管理工具如 GIS，來處理收集到的田間各項資訊。這些資訊有助於精確評估田間網格間如作物密度與分布、土壤肥沃、養分、水分之差異，以精確計算作物生長所需之各項要素，給予作物或農地相匹配之投入、處理，達到減少浪費、增加利潤、保護環境之目標。

衛星或航拍影像可對土壤肥沃(養分)不同、水分不同、或植物生長進行辨識，有助於對田區做完整調查，GPS 可將坐標作精準之定位，GIS 可將各項網格間差異做出田間網格間各項變異的地圖，並對各網格間的差異做不同處理，故精準農業又稱為變異率之應用(variable-rate application, VRA)。

精準農業之概念可思考於下面幾個層面提升田間之作業或管理：

- 一、農業面(Agronomical perspective)：考慮作物生長實際需求，例如更加的施肥管理。
- 二、技術面(Technical perspective)：對田間管理做出較佳的時間安排，如各階段農事活動之安排。
- 三、環境面(Environmental perspective)：減少農業對環境的影響，如更正確估計農作氮肥需求，可減少過多之氮隨著排水流入其他地區，影響生態環境。
- 四、經濟面(Economical perspective)：可減少投入，增加產量，提高效率。

精準農業係以資訊與技術為基礎對不同土地與農作物的利用尋求最佳的農業經營管理，一般來說，精準農業應具備下列技術之應用要素：

- 一、農作土壤資料庫：掌握土壤特性，如何種土壤適合何種作物。
- 二、地理資訊系統：掌控農地特徵之空間分佈。
- 三、全球定位系統：取得特定點座標。
- 四、遙測技術：運用遙測(如空照圖輔以影像辨識)，減少人力之負擔。
- 五、自動化農機作業系統：自動化農事處理。
- 六、農作產量評估：對產量進行監測與產量區繪製，並可藉此修正評估模式。

精準農業應用自動化之機具進行精準之農事控制，機具通常具有天線、LAPTOP 輕便電腦、接收器、線圈、噴頭(或相關執行動作之設備)等，利用 GIS 加上 GPS 定位資訊，即可達成依據座標所在位置之田間網格資訊，執行特定動作。以下列舉相關應用之案例：

- 一、設計自動啟閉噴灑裝置，例如噴灑機具接近果樹時，始自動噴灑灌溉或施肥。
- 二、利用定位，達成進入特定地區，做特定事情。例如：接近水源區則禁止噴灑農藥。
- 三、柑橘產量估算系統(Citrus yield mapping system)：利用GPS 結合攝影設備，對柑橘園相片進行分析，包含顏色辨別樹葉或果實，分析出數量，獲得分析模式後，藉由自動化方式對整個柑橘園進行分析，即可估算柑橘產量。
- 四、GPS 加上攝影之相關應用也可用於從樹葉顏色分析推估是否具有植物傳染病。

精準農業引入台灣時間尚短，農委會於 1997 年研擬「我國精準農業發展方向與策略」規劃國內精準農業研究試驗研究之準則。精準農業目前在台灣主要仍屬於研究階段，在農委會規劃中，重點主要集中在台灣水稻精準農耕體系之相關研究。

3-4 GPS 定位及地真資料收集

3-4-1 簡介

全球衛星定位系統（GPS）是美國國防部從 1960 年代開始，投入 20 年時間，花費 100 億美元的成果。原本是作為軍事用途，後來逐漸開放 GPS 民間航空業使用。目前 GPS 系統在地球上空配置有至少 24 顆衛星，佈置在離地球表面約 20,200 公里上空之近似圓形軌道上，其採用近似圓形軌道之目的在於增加地面上可見範圍及全球均勻覆蓋。GPS 係利用測量獲得地表與數顆衛星的距離，求得地表位置的坐標，和傳統地面測量相比，具有測點間不必相互通視的優點，並可同時獲得三維點坐標及基線向量。

在衛星影像分類時，不論是監督式或非監督式分類，皆需收集地真（ground truth）資料輔助分類，而地真資料必須經由 GPS 定位後方可得知其坐標位置，以便後續利用，因此，GPS 在遙測技術之應用上有其重要性。

3-4-2 現場操作

本次實習是由 Mr. Daniel Preston 帶領各位學員實地操作 GPS，藉由七組坐標資料去現場定位，尋找出正確的位置。各學員由 Frazier Rogers Hall 出發，依照 GPS 儀器的指示陸續的在校園中尋找目標，最終再回到 Frazier Rogers Hall，在尋找目標的同時也順便再一次熟悉校園。相關操作照片如下：

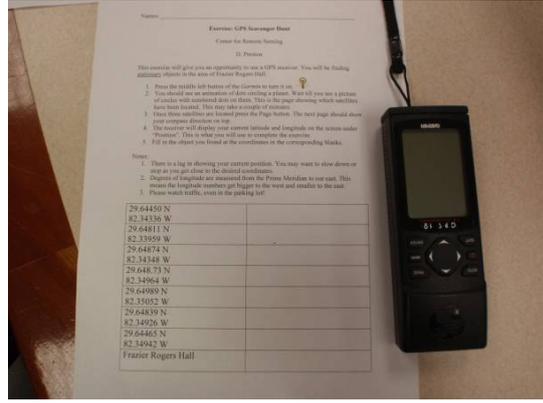


圖 3-13 GPS 儀器及尋找目標之坐標資料



圖 3-14 GPS 儀器現場操作與設定

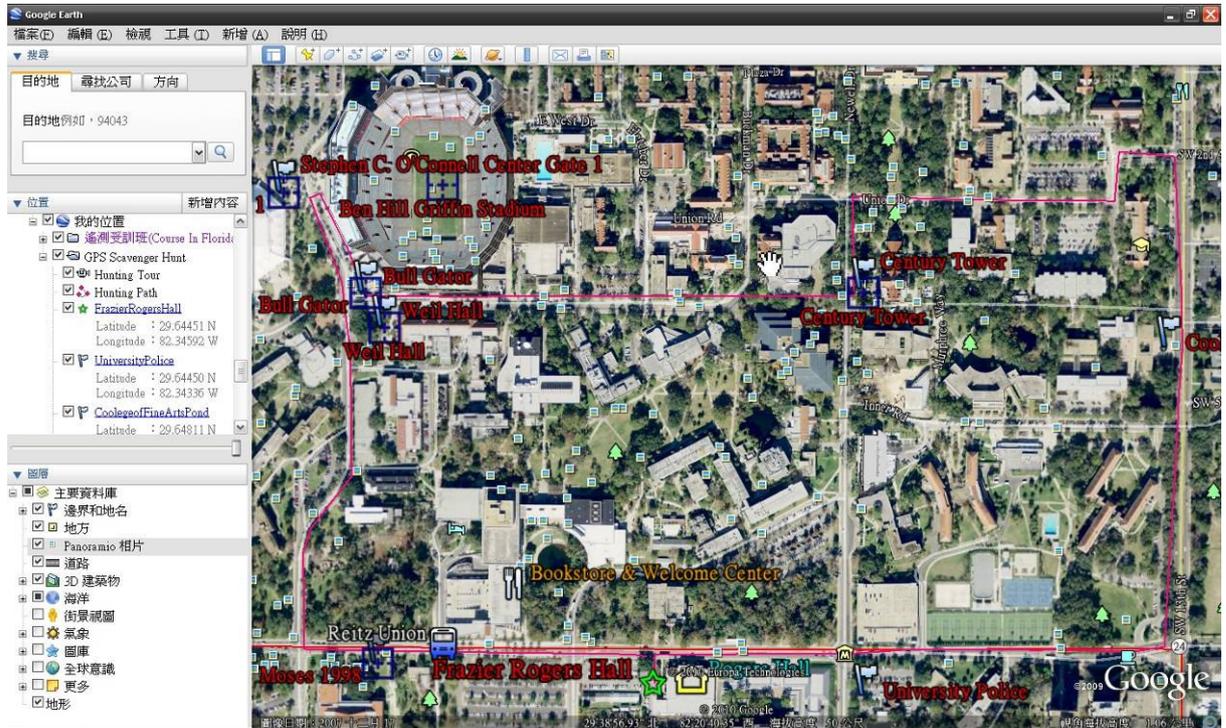


圖 3-15 實習課尋找目標之位置及路徑

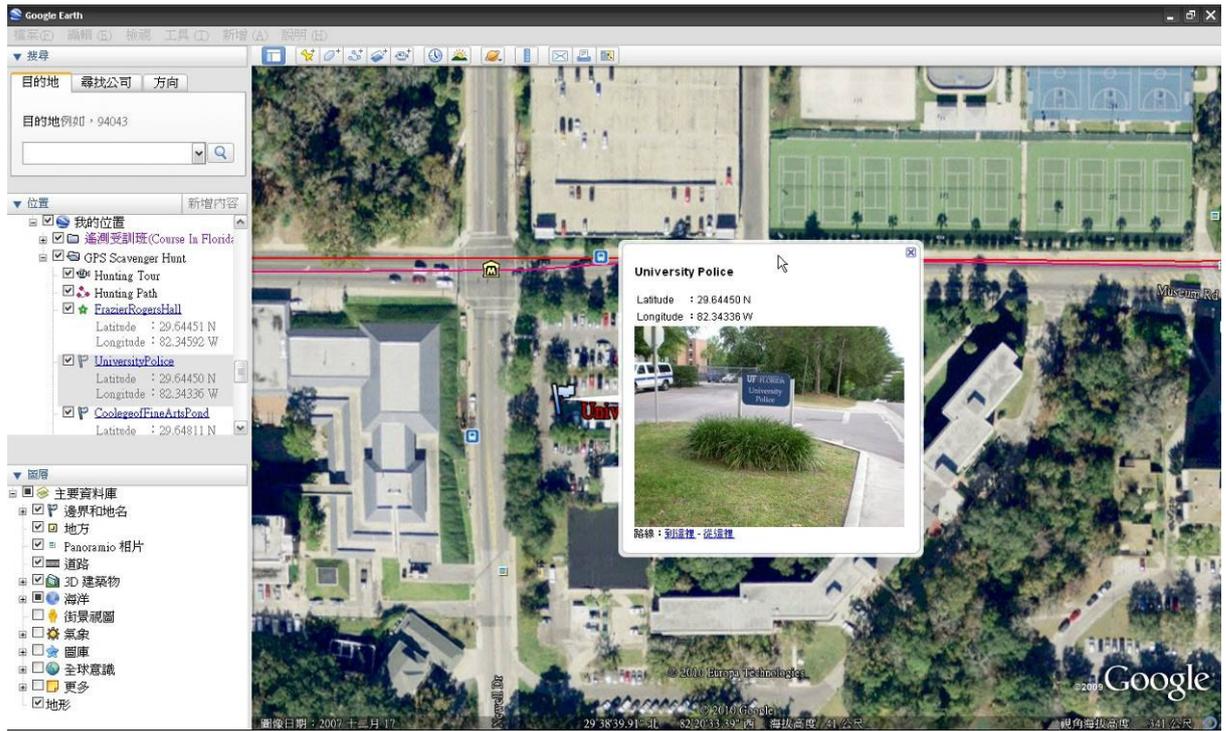


圖 3-16 尋找之目標位置一(University Police)

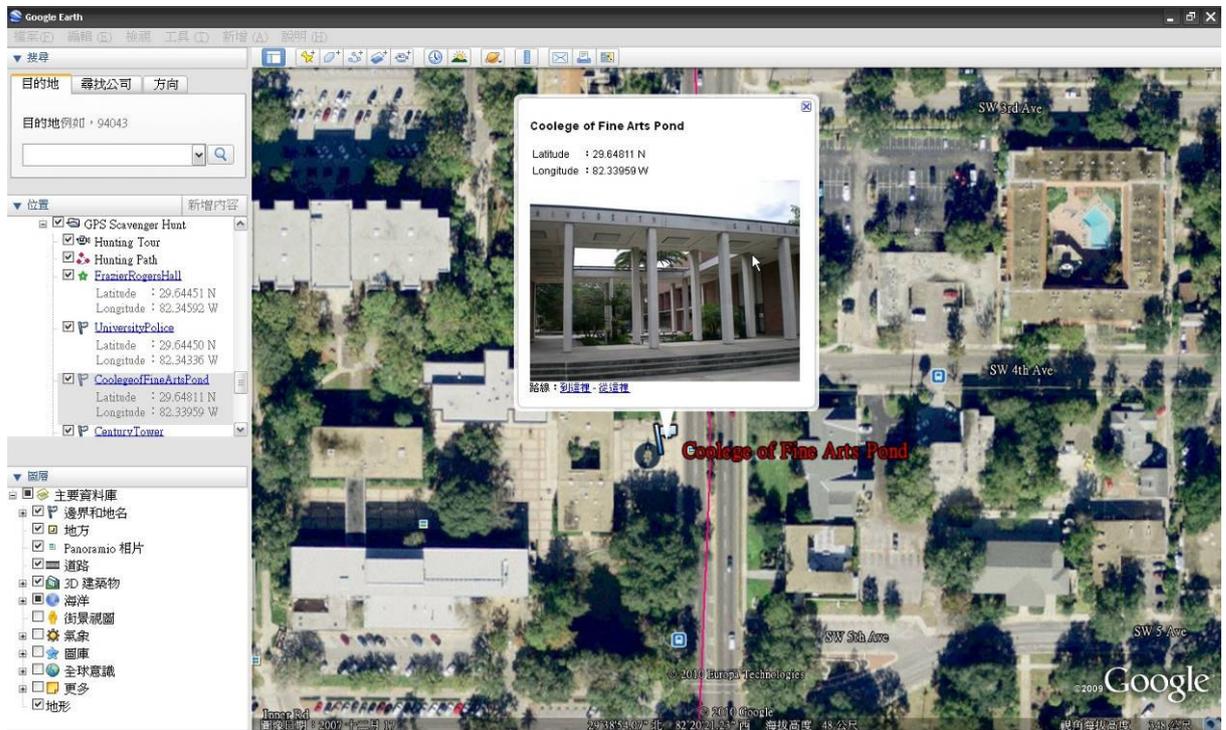


圖 3-17 尋找之目標位置二(College of Fine Arts Pond)

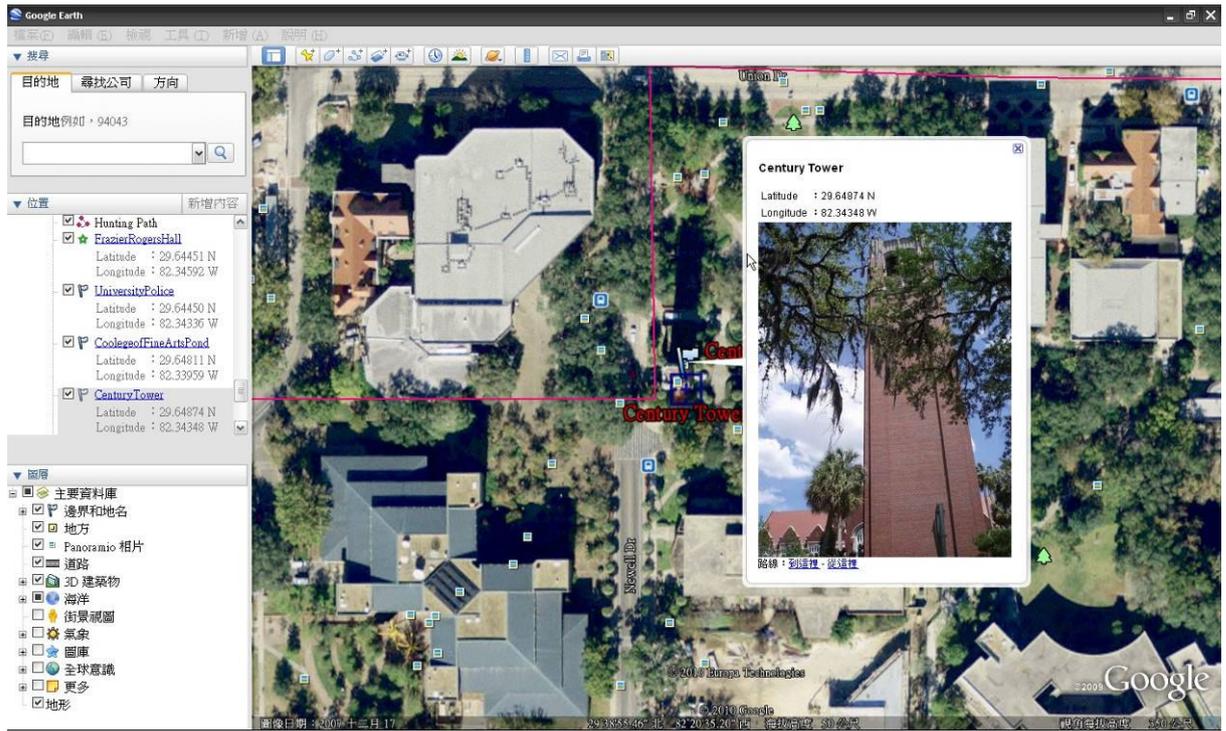


圖 3-18 尋找之目標位置三(Century Tower)

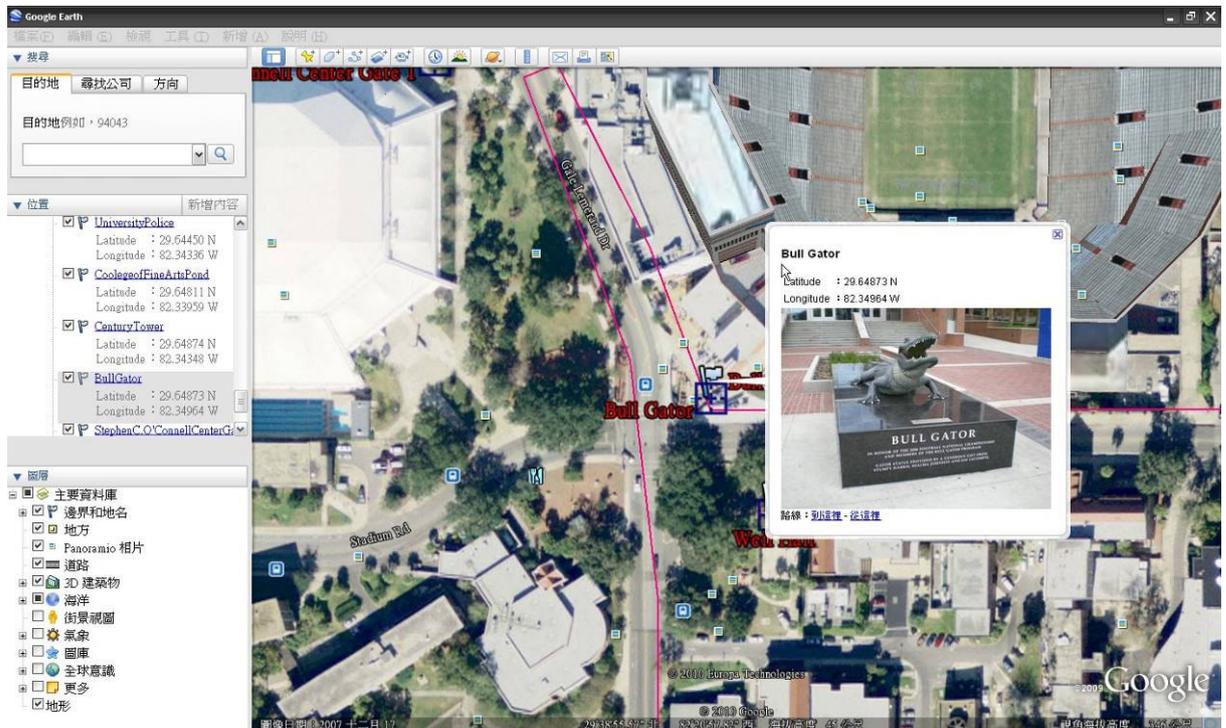


圖 3-19 尋找之目標位置四(Bull Gator)

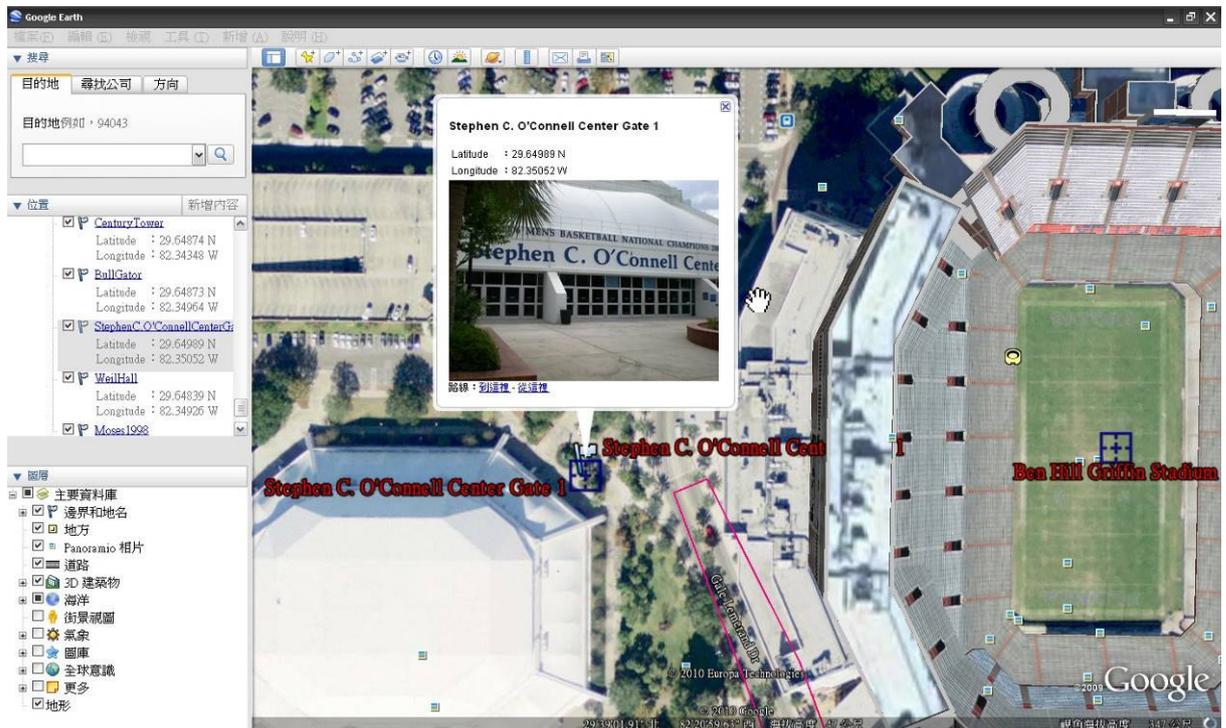


圖 3-20 尋找之目標位置五(Stephen C. O'Connell Center Gator1)

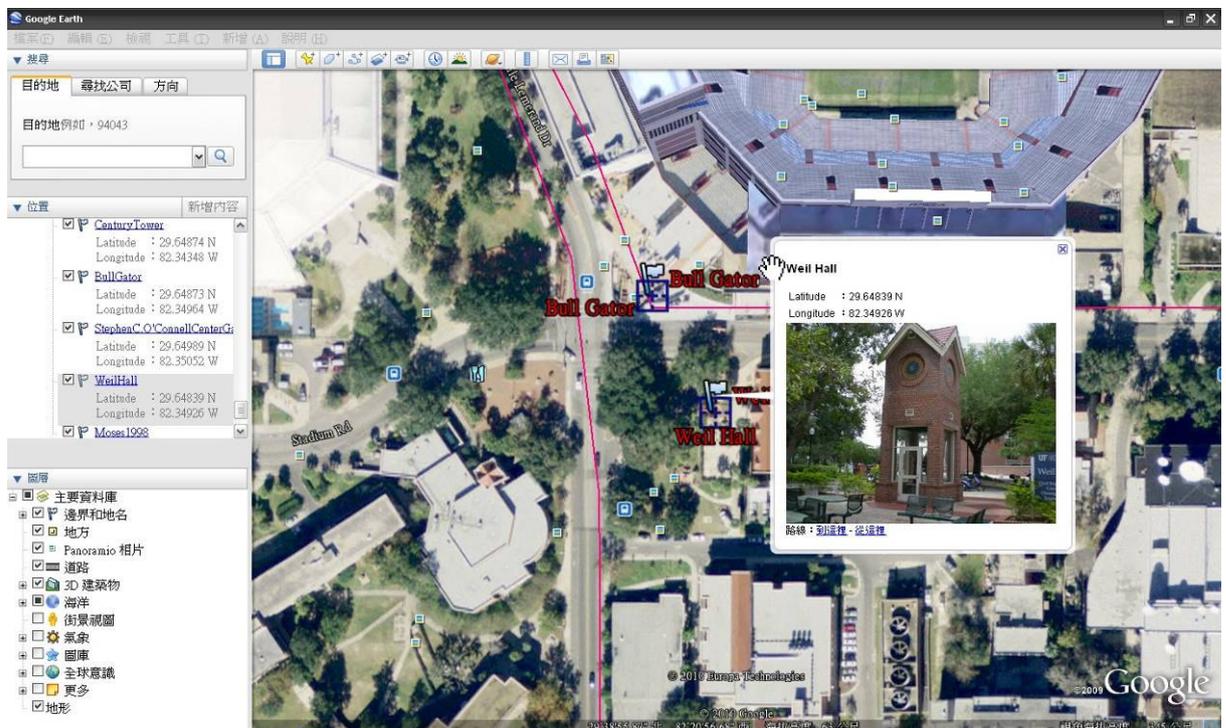


圖 3-21 尋找之目標位置六(Weil Hall)

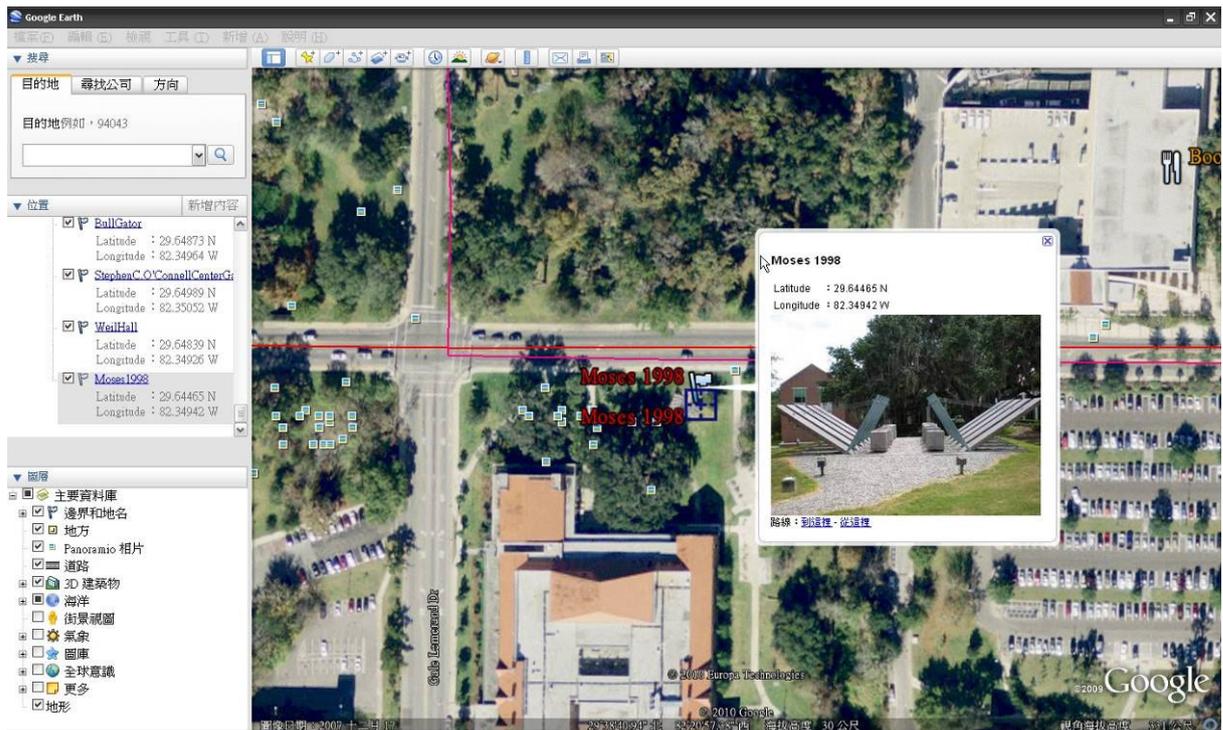


圖 3-22 尋找之目標位置七(Moses 1998)

3-5 微波遙測

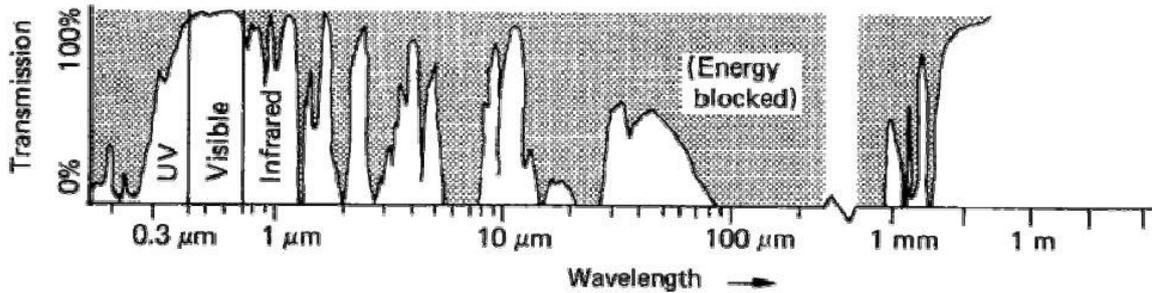
3-5-1 微波簡介

微波的定義為波長 1mm 至 1m 之間的波段，頻率為 300GHz 至 300MHz 之間。而一般的可見光 (VIS) 與紅外光 (TIR) 主要是觀測地表表層而已，因此，其觀測對象不同。而微波不受太陽光源影響，日夜均可以使用，且不受雲層、小雨及霧氣的影響，在赤道或熱帶地區微波也不會像熱紅外光易受干擾。因此，可以用於氣候較差之條件。應用遙測影像時，最好的條件為同時具有 VIS/TIR/Microwave 影像，可以同時獲得完整的資訊。

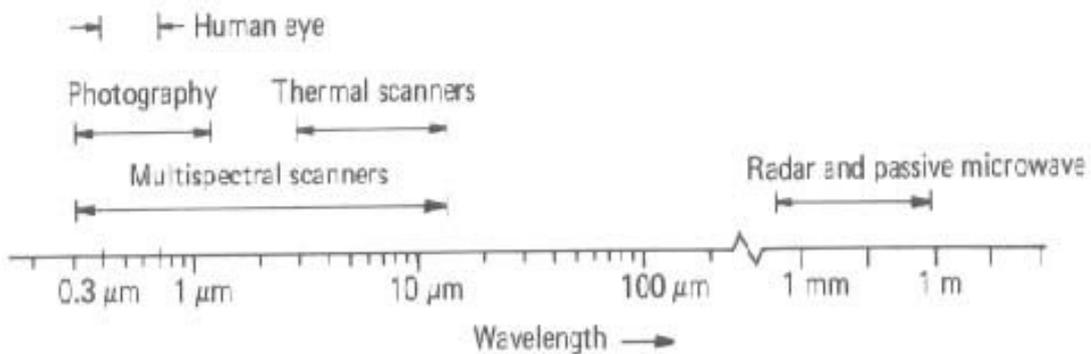
較長的波長可以穿透到較深的土壤層，一般 20cm 波長可以用於 5 至 10cm 深的土壤層。而沙漠地區因為含水量較少，容易穿透，可以探測到 2m 的深度，或可以改用較長的波長來進行探測。

由於微波遙測對於水體的反應相當強烈，而且較長波長的微波可以透過土壤進入地表下，因此，常用微波來進行土壤含水量的判釋。

遙測是利用可見光、紅外光及微波來做為影像資料的來源。透過影像資料處理後可以做為土地分類使用、防災救災、地理資料處理及環境保育工作。



(a) 能量被吸收的情形



(b) 人類利用(a)圖之結果，所設計的感測器在電磁波譜之分布情形

圖 3-23 光譜特性

可見光遙測對於物體的表面做資料的收集，因為可見光對表面的資料較為敏感；而微波波段因為波長較長對於物體具有穿透力，所以可以得到較有深度的資料。例如：對於整顆樹可以從樹冠穿透樹葉至根部，雖然微波可能被吸收或反射，無法達到根部，但也可以得到樹冠資料，又如沙漠地區為較乾的地區，含水量幾乎等於零，微波可以穿透地表至 2~3 公尺的深度，可以利用此特性查看此區域過去是否有水渠或水道經過。

3-5-2 微波遙測

微波遙測可分為主動系統與被動系統:

- 一、被動微波遙測:系統自身不發射微波波束，只是接收目標物發射或散射的微波輻射。
- 二、主動微波遙測:信號來源系統自身發射微波輻射，並接收從目標反射或散射回來的電磁波。

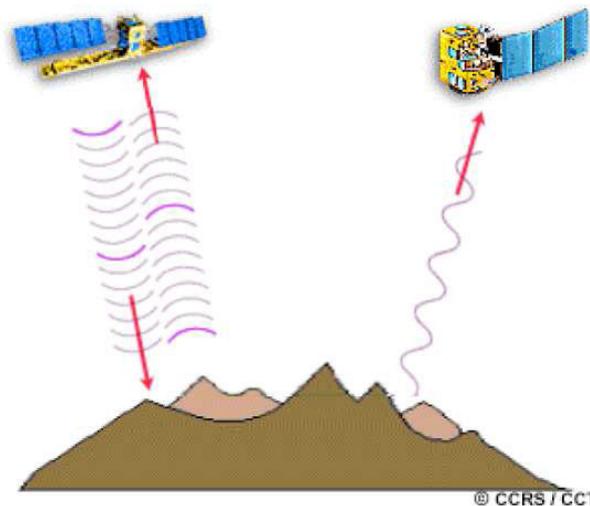


圖 3-24 被動微波遙測及主動微波遙測示意圖

而通常發射器與接收器合而為一時，訊號為往回反射的所以此系統稱為背向式反射系統（Back Scatter），另外我們會先在實驗室裡去對某一物體發射微波並在其周圍設置很多接收器，這樣我們就可以知道物質在那一個角度反射訊號較強以此來推論其物體的特性，此一方法稱為 Monostatic，若發射器與接收器為同一角度時稱為 Bistatic。無論是在地面、飛機或是衛星載具雷達系統，大部份都是發射器與接收器都是同一載具上的。

可見光與近紅外光在主動式系統有下列幾種常見例子，如使用強制閃光的相機、雷射測距儀、手機（MW-Cell phone）及 RADAR（RADio Detection And Ranging）；而在被動式系

統中有不使用強制閃光的相機、LIDAR 及微波輻射儀（MW-radiometers）。

微波遙感波段：300MHz 到 300GHz（波長從 1mm 到 1m）被無線電界劃分為：甚高頻(VHF)、特高頻（UHF）、超高頻（SHF）和極高頻（EHF）。應用中的常用波段：X, C, L, 波長增加，穿透能力增加，在晴朗天氣狀況下，大氣對於波長小於 30mm 的微波略有衰減。

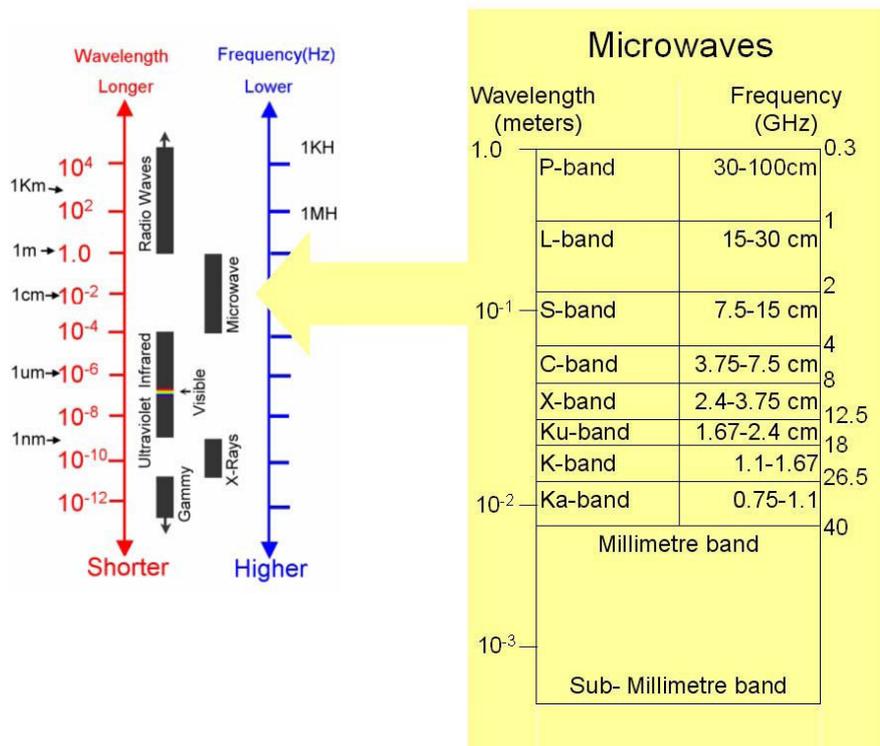
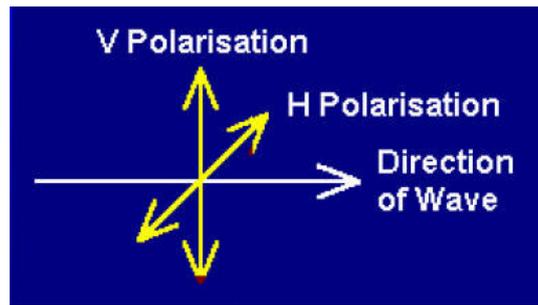


圖 3-25 電磁波波長與頻率關係圖

而極化現象可分為垂直（H-pol）或水平（V-pol）兩種，亦可以分為四種：HH、VV（相同極化），HV、VH（相異極化）。主動式系統得到何種極化現象取決於接受者，而被動式系統則是物質放射和散射取決於極化現象，例如 H-pol 對於土壤及水是非常敏感的。

水準極化：電場振動方向平行於水平面（“H”極化）

垂直極化：電場振動方向垂直於水平面（“V”極化）



Transmitted	Received
H	H
H	V
V	H
V	V

圖 3-26 極化現象的組合

微波主要為觀測物體的幾何形狀與地面的介電常數。介電常數（Dielectric）與物質的電子特性相關，介電常數越高，反射率越高。介電常數一樣的不同物質不會產生反射。微波從介電常數低的物質射入介電常數高的物質會有反射現象產生。物質介電常數越高，其反射率越高，則發射率越低。物質幾何特性（Geometric properties）以主動式系統為例，波長射向平滑的表面可以產生較佳的反射，相較於粗糙的表面則會有不同方向的散射產生。

3-5-3 雷達系統

雷達大致可以分成主動式與被動式雷達系統主動式雷達系統在傳送雷達端發射電磁波，且在碰到目標物後反射或散射，在被可接收各個方向的接收雷達端接收，於是可以利用兩個不同銅綠境的雷達訊號永以估計目標物的參數如距離位置移動方向速度等。傳送雷達與接收雷達可以是不同的雷達，也可以是相同的雷達。

雷達種類如下：

- 一、都卜勒雷達：應用了都卜勒效應所製造的雷達系統。使用都卜勒效應雷達，能夠即時反應出目標的位置，速度，路

徑。都卜勒效應為「當觀察者(受信源)與聲源(發信源)之間，具有相對運動時，其聲頻會隨著兩者之間的距離而變化」。這種變動是可以量化並且以程式計算出來的。所以都卜勒效應能夠廣泛用於偵測物體運動的路徑與速度。

二、飛機定位器：航空交通控制。

三、側視雷達（SLR）：起源1960年美國國防部在軍事用途上，在1980年代慢慢應用於自然資源及地球環境保育上。

四、主動式雷達在影像處理及分析不同於被動式雷達，在空間解析上主動式雷達較被動式雷達佳，同樣為L波段時，主動式雷達空間解析度可達10~100公尺，而被動式雷達只能達50公里。

側距(Range)方向是垂直雷達載具航線算起，而且是影像特有的兩個尺寸之一，另一個則是平行於航線的方位方向；方位解析力和雷達波束頻寬成正比。如同光學系統需要大型透鏡或反射面鏡以產生好的解析度一樣，更低頻率成像的雷達則需要更大的天線，以產生精細的影像。但是波束寬度和天線的尺寸成反比，因此能夠經由移動這條實際天線的同時，累積一系列沿著軌跡的回波，因而達到數公里長的效果。

在另一方面來說，所使用的雷達波長賦予穿透雲霧和塵埃的能力，而超越使用波長較短的可見光或紅外線器材。表面紋理的變化和目標的方位正好是影響反射波能量的兩個因素，而且和成像後的像元亮度有關。其解像力有二種求得沿航線方向解析力的基本技術，首先是利用雷達波束掃過平行於載具航線的條狀地表的，最大解析力受限約為實際天線長度的二分之一。雷達波是經過偏極化的方式傳送，不是水平就是垂直（也就是平行或垂直雷達訊號方向），而且由天線接收的反射能源也不需要一定和原來的偏極(Polarization)相同。事實上真正天線在傳送雷達波時也在移動，此意謂回波離開時受到都卜勒

(Doppler)頻率負偏移影響，如同波束接近目標時受正偏移一樣。

合成孔徑雷達 SAR (Synthetic Aperture Radar)最早起源於 1950 年代，當時的科學家基於軍事用途，將雷達架設於飛機上探測目標物，藉以提昇軌向 (along-track) 的解析度，此雷達探測系統即稱之為側視口徑雷達 (Side-Looking Aperture Radar, 簡稱 SLAR)。SLAR 在空載 (airborne) 的應用上，解析度堪稱可接受。但在星載 (spaceborne) 的狀況，為了達到標準的解析度，依理論而言需要數百公尺長的口徑長度，對硬體結構而言是絕對不可能達到的。所幸 Wiley (1965) 隨即提出 “Doppler beam sharpening” 理論，利用雷達回波具有不同都卜勒頻率位移 (Doppler frequency shifts) 的原理，達到提高軌向解析度的目的。使雷達探測於衛星上的應用從此不再受限於航高和天線長度的限制，而雷達遙測也從此邁入 SAR 的新紀元。

目前正在運作的 SAR 衛星包括由美國太空總署於 1978 年發射的 Seasat，蘇聯於 1991 年發射的 ALMAZ，歐洲太空總署於 1991 年所發射的 ERS-1，日本於 1992 年發射的 J-ERS-1，以及 1995 年由歐洲太空總署發射的 ERS-2 和由加拿大發射之 Radarsat。

SAR 的原理主要是由雷達發射出微波波段的電磁波到所探測的目標物，再計算雷達波束 (Radar Beam) 範圍內的回波能量，經資料處理後以獲取初步影像。

合成孔徑雷達的操作原理相當複雜，首先我們假設一搭載 SAR 的飛機，SAR 的偵測方向與飛機軌道垂直，如圖三所示。基本上，SAR 可以產生二維(2-D)的空間影像，其中一維稱作 range，而另一維稱作 azimuth，SAR 影像所顯示的則是其視角方向(line of sight)的相對距離與位置，視角方向指的是從衛星“看”目標物的方向。與大部分的雷達相同，SAR range 方

向的解析度是由精細的測量電磁波脈衝從發射天線與接收天線接收的時間而決定的。

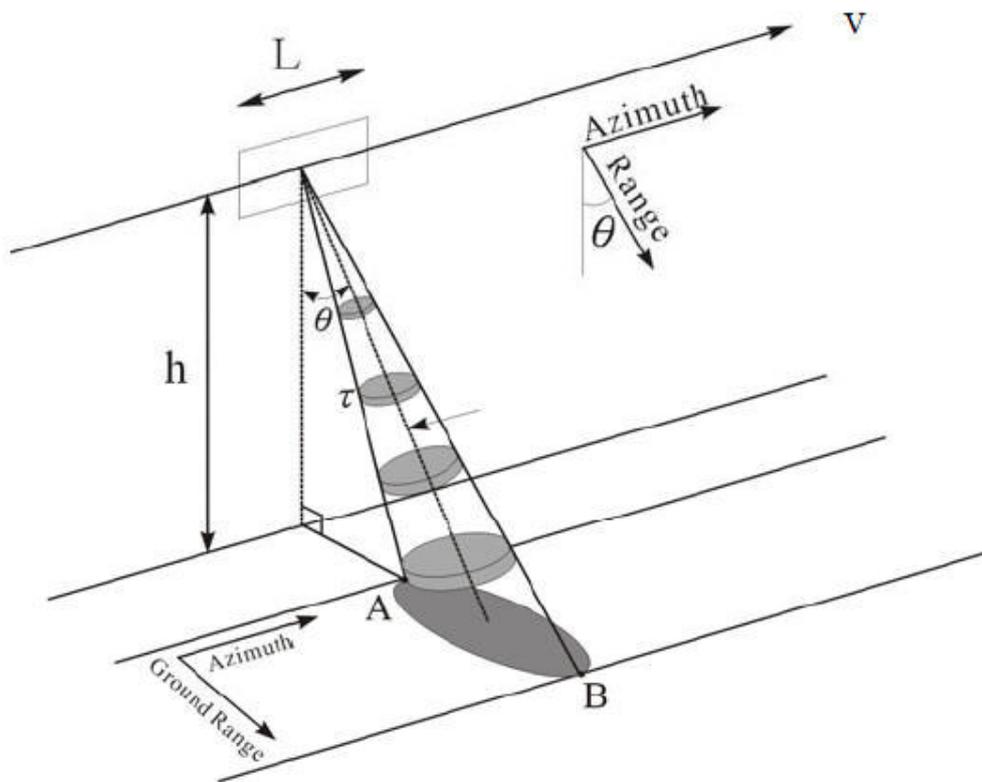


圖 3-27 合成孔徑雷達影像示意圖

另一維度稱為 azimuth，與 range 垂直。與其他雷達不同的是，azimuth 方位的解析度可以於 range 的不同，azimuth 的解析度基本上式靠著天線的寬度而決定，越大的天線可以使對目標物的對焦更清晰，進而使 azimuth 的解析度越高。

3-6 光達 (LiDAR)

3-6-1 簡介

光達 (Light Detection And Ranging, 簡稱 LiDAR) 或稱雷射掃描儀 (Laser Scanner)，為使用雷射光束進行掃描式測距之系統，光達技術 (LiDAR, Light Detection And Ranging) 的廣義定義是指以雷射光對目標物進行量測的技術，而目前所稱的光達是指利用雷射光，對目標物進行高密度的掃描以獲取目標物三維形貌的技術，目前大致可分為三種：空載光達

(Airborne LiDAR)、地面光達 (Ground LiDAR) 及太空光達 (Space LiDAR)。其中空載光達以高精度、高解析度、高度自動化且高效率的優勢，已成為世界各國進行大面積數值地表資料測製的主流與趨勢，其多重反射回波之特性，可同時獲取地面及其覆蓋物 (植被、電力線等) 之精確三維坐標。

空載光達系統係將雷射系統配備於飛機或直升機上，結合全球定位系統 (GPS) 與慣性導航系統 (INS)，進行地表掃描測繪，經解算後，同時獲得地面點位之三維坐標，使地形高程測量作業快速而準確，主要應用於大範圍地區資料的對映，如數值高層模型 (Digital Elevation Model, DEM) 及城市建模等，其資料品質達一平方公尺 2~3 點 (解析度約 50~30cm)。至於空載光達之特性包括獲取多重反射值/波段的能力、精確度之標準差 15~20 公分、不連續重擊點 (Hard Hit) 在垂直方向上的均方根值 (RMSE, Root Mean Square Error) 為 20 公分、水平精確度為 2 倍的光跡 (Footprint) 大小等。另海洋調查系統，也屬於空載光達系統之一，主要使用紅外光 (海水表面) 及藍-綠光 (海水底層) 波段進行水深測定，最大深度可達 50 公尺，其深度與水平之精確度均可達 25 公分。

地面光達系統適合掃描細部資訊，可以擷取到目標的側面資料如牆壁、樹根、樹幹等，與全球定位系統 (GPS) 搭配可以直接獲得坐標資料，其資料解析度可以達到公分等級以上。至於地面光達之特性包括獲取多反射值/多波段的能力、精確度在 100 公尺距離內標準差小於 1 公分、在 100 公尺距離內垂直及水平的均方根值 (RMSE, Root Mean Square Error) 為 1 公分等。

太空光達系統係將雷射系統配載於太空船或太空站上，主要應用於地球觀測與全球監測、大氣監測、行星與月亮的映射、行星的登陸系統等方面。

3-6-2 光達基本原理

空載光達以推帚式（push – broom – system）掃描的方式，將每一束雷射光傳播至地表面。GPS 紀錄飛機瞬刻掃描的位置，IMU 紀錄飛機掃描時之姿態角，在具備位置、角度、距離條件後，可即時將地表覆蓋面的光達掃描資料記錄下來。空載光達的作業原理如圖 1 所示：

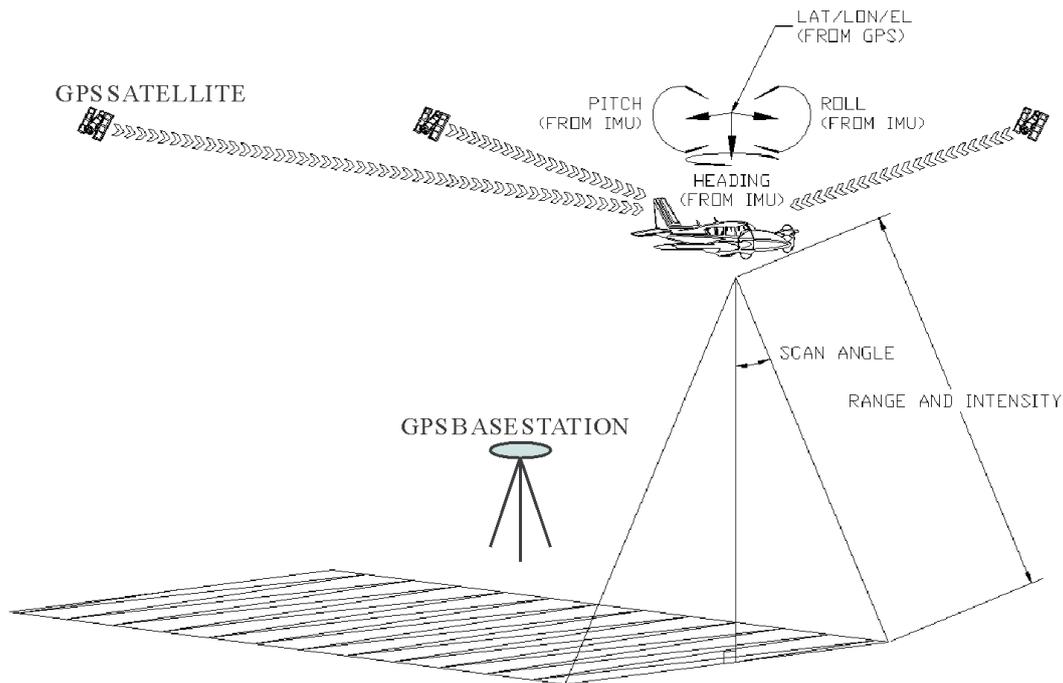


圖 3-28 空載光達作業示意圖

LiDAR 訊號具有一項非常特殊的「多重反射（multiple echoes）」能力，即發射單一脈衝而能接收最多達四個反射回波訊號，因此有機會可同時量測到地表及樹頂甚至樹幹的點位，或是電力的輸配線路，其原理為：LiDAR 發射之雷射光為圓錐狀，當接近地表時單一光束投影在地表之涵蓋範圍（footprint）約為 50 公分直徑之圓形，而所獲取的資料有部分落在樹木表層，有些為樹幹位置，而有些則為地面反射點，因此可同時測得上述之資訊。根據 LiDAR 雷射光反射回波的情形，也可藉此了解地面物體對於雷射光的穿透情形，其多重反射之原理如圖 3-29 所示。

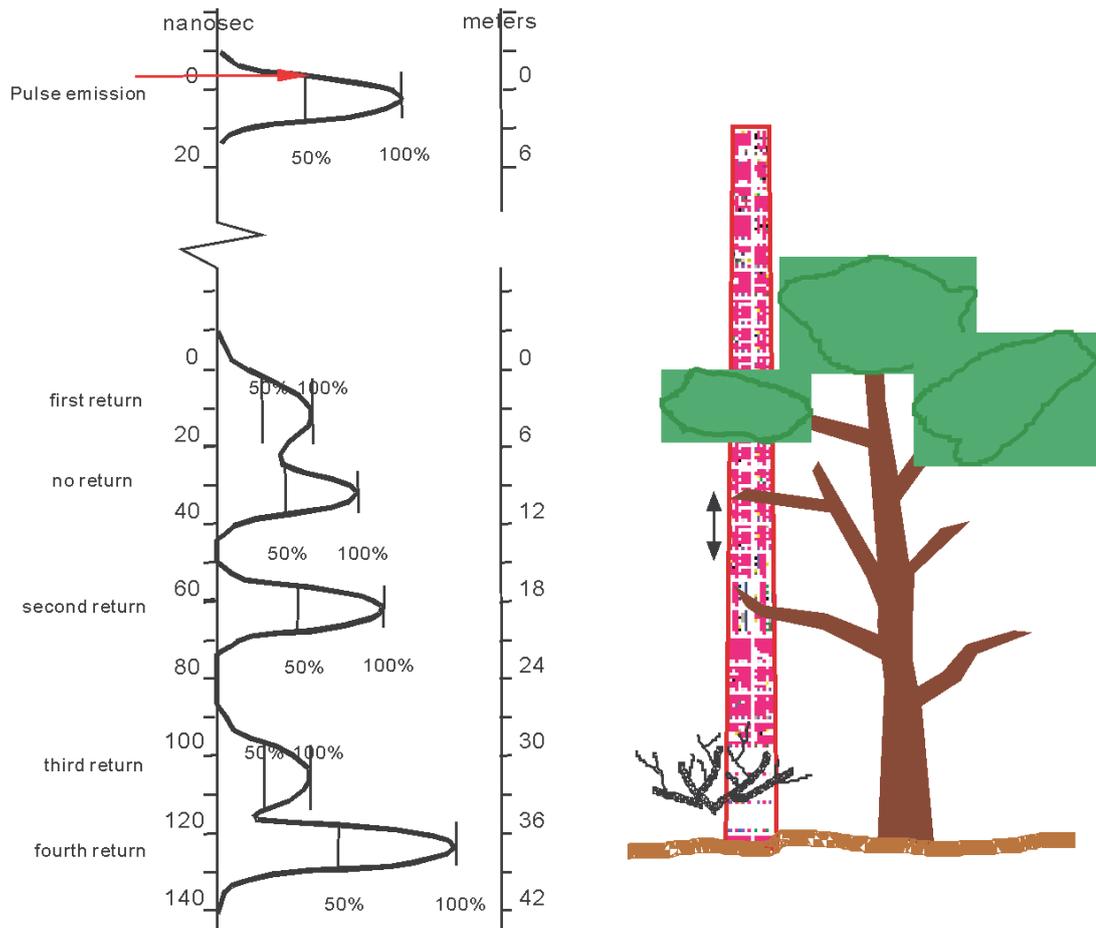


圖 3-29 光達訊號多重反射回波示意圖

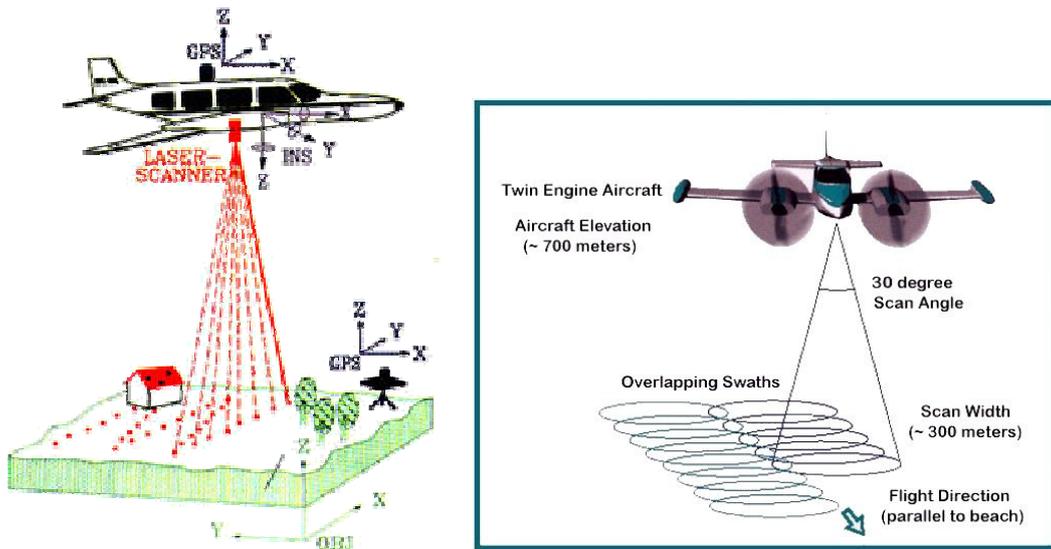


圖 3-30 空載光達三維雷射掃瞄示意圖

空載光達掃描獲取之大量坐標點，由於分布密集而稱為點雲（Point Cloud），如圖 3-31 為佛羅里達大學 Weil Hall。點雲資料除點位本身具備精確之三維坐標外，並同時紀錄原始雷射脈衝之反射強度（intensity），部分機種甚至可記錄類似數位影像的 RGB 三波段灰度值，因此隨著地表之不同反射特性得以呈現類似航空照片之影像特徵；經過軟體與人工之處理，可將各雷射點進行過濾（filter），將屬於地面點的數據分離（地面點可產製數值高程模型（DEM，Digital Elevation Model），即面狀之地表起伏資訊，這也是空載光達的基本成果，可應用於地圖測繪、洪災模擬、地質分析、災害調查等應用。而其餘的數據可進一步再區分為植被、建築物等類別，可作為後續森林資源估算、房屋模型建置等應用。

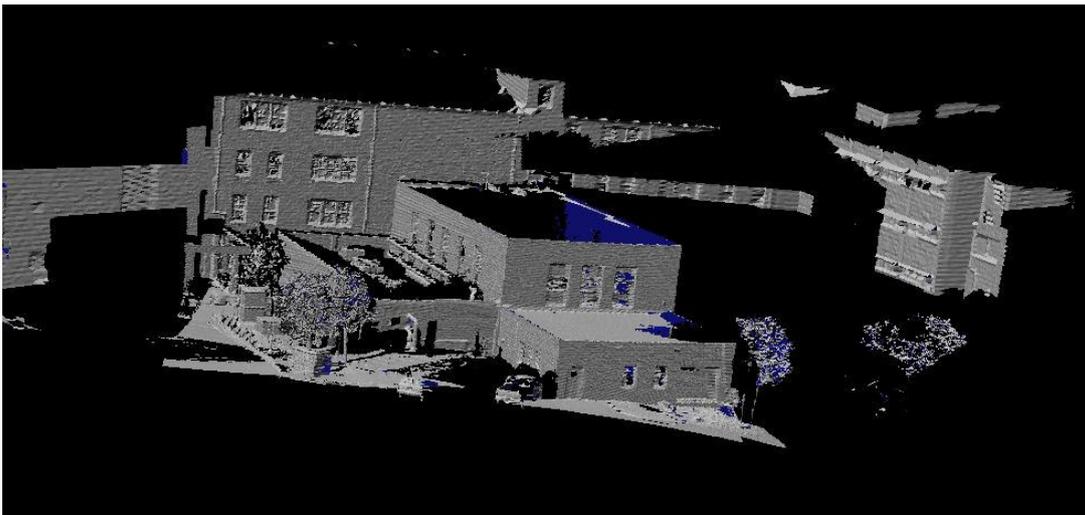


圖 3-31 Point clouds at Weil Hall, UF

3-6-3 數值地形模型

DTM(Digital Terrian Model)數值地形模型，泛指任何以數值化(digital)的方式來展現 3D 空間地形起伏變化的狀況。其應用範圍相當廣泛，在地形分析上可用來進行坡度坡向計算、等高線製作，土木工程方面用來做挖填方計算、坡地或道路開挖，災害評估方面可用在災害崩塌容積計算，其他常見可用來做三度空間展示等等，其資料格式可分為：規則網格(GRID)、不規則三角網(TIN)、數值等高線(Digital Contour)三種，一般生產之

DTM 資料通常都以使用規則網格的資料格式，在每個網格中紀錄其 XY 坐標和地形高程屬性(X, Y, H)，並也能夠透過 GIS 軟體轉換去產生不規則三角網或等高線的資料格式。

DSM (Digital Surface Model) 則指的是地表上所有地物，包含人工構造物或自然森林或人工作物覆蓋地面的高程；DEM (Digital Elevation Model) 首見於 1970 年代美國地質調查署以二維矩陣方式儲存高程資料的資料格式。

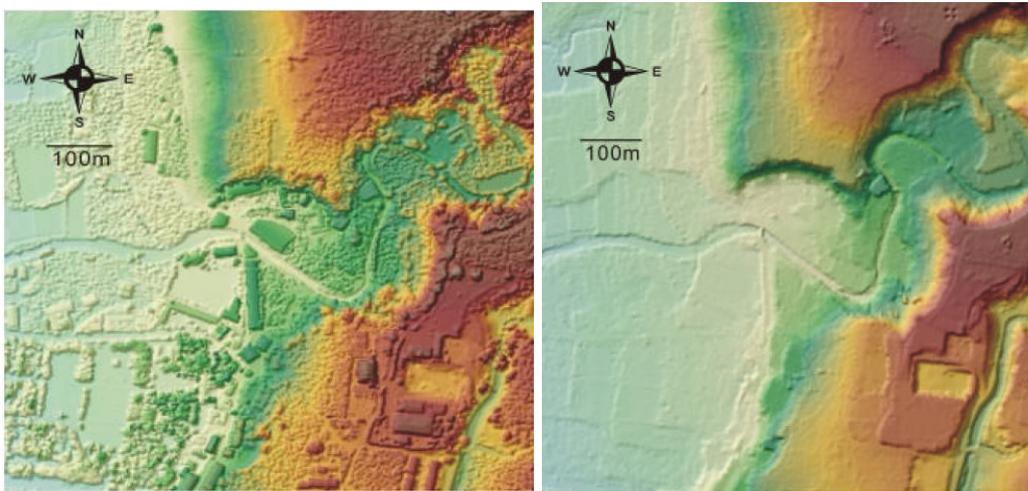


圖 3-32 DSM and DEM