

國立臺灣大學地理環境資源學系暨研究所

專題討論一期末報告

Department of Geography

College of Science

National Taiwan University

Final Presentation

以SLAM方法建構珊瑚礁水域探查系統—以野柳地質公園為例

Using Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) to
Construct a Reef Waters Survey System -- A case study in Yehliu
GeoPark

黃文男

Huang Wen-nan

指導教授：朱子豪 教授

Advisor: Chu Tzu-How, Ph.D.

中華民國107年1月

Jan. 2018

摘要

珊瑚礁生態聚落對於環境有巨大的影響，但是目前除了由潛水人員人工作業之外，缺乏其他有效的調查工具。若能夠利用低價格水下無人載具進行調查，便能提升研究效率以及減少人員傷亡。過去雖然有研究以地面或是空中的無人載具以衛星訊號定位來進行自主式/半自主式的調查。但是在水中，由於水體對於電磁波的吸收效果以及其本身的光學特性，以至於無法直接運用於水下無人載具。另一方面，深水水域雖然可以應用自主式水下無人載具以聲納進行研究，但是其精度與範圍卻無法適用於淺水水域的珊瑚礁生態聚落調查上。故本研究將利用低價格水中無人載具搭配SLAM方法來進行定位，並於資料蒐集時即時提供相對位置及水中生物以及海底底質等供參考用的資訊。

關鍵字：水下、遙測、機器人、擴增實境、拓樸學

ABSTRACT

Coral reef ecosystems has a huge impact on the environment, but lack of effective investigating tools to survey. Using low price remotely operated underwater vehicles to investigation, not only can prove efficiency but also reducing casualties. Several research using Unmanned Ground Vehicle or Unmanned Aerial Vehicle with positioning by satellite signal doing autonomous / semi-autonomous investigating before. But underwater, electromagnetic radiation absorption in water bodies and its optical properties, cannot be applied to remotely operated underwater vehicles directly. On the other hand, using Autonomous Underwater Vehicle with Sonar to investigating in deep waters, However, its accuracy and scope cannot be applied to ecosystems of shallow waters coral reefs. Therefore, this study will use positioning by a low price remotely operated underwater vehicles with Simultaneous Localization and Mapping method, and provides reference information including relative position, index object indicating in real time during data collecting.

Keyword: underwater, remote sensing, robot, augmented reality, topology

第一章 緒論

第一節 研究動機

根據USGS(United States Geological Survey)和NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)的調查，海水總量分別約為332,519,000立方英里以及321,003,271立方英里，海洋覆蓋了地球表面約70%的面積，而這個水下領域的95%未曾被人眼所見(NOAA, 2017)。

珊瑚礁生長的區域面積約為28萬平方公里，僅約占海水覆蓋面積的0.2%，但是綿貫100個國家地區以上超過150,000公里的海岸線。珊瑚礁主要形成於海水表面和水深數十公尺之間(何立德等，2002)，珊瑚礁非常有效率的吸附了來自海洋的元素。牠們透過吸收海浪的能量減少海岸的侵蝕對環境保護產生貢獻。牠們降低風暴、颶風以及部分海嘯能量的傷害。除此之外，牠們保護了珊瑚礁和海岸之間諸如：海草、潟湖以及人類位於海邊的居住區等的生態系，根據統計，珊瑚礁生態聚落是25%水生生物的家園(World Wildlife Fund, WWF; Coral guardian)。牠們比人類以混凝土消波塊插在我們脆弱的海岸上還來的有用。

東亞野生物貿易研究委員會(2017)指出珊瑚有五大功能：維持漁業資源、吸引觀光客、維護了生物多樣性、保護我們的海岸線、保護我們的生命等等。馬來西亞有將近30%的漁獲來源是來自珊瑚礁生態系，其中不乏海參、龍蝦等具有商業價值的漁業資源；觀光性質的水肺潛水深度不大於水深40公尺，而世界10大潛水勝地皆位於珊瑚礁聚落；如前所述，珊瑚礁生態聚落除了是水生生物的家園之外，其中亦有許多資源可以用來製作藥物、精煉化學物質以及當作人類的食物來源；完整的珊瑚礁是天然的消波塊，海浪衝擊力70%至90%的能量會被珊瑚礁吸收或衰減，而珊瑚礁具有自我修補的力量，死掉的珊瑚也會被海浪分解，分解後的珊瑚會產生類似星砂的沙粒狀物質，可以補充被海浪沖走的沙粒。某些特定珊瑚的組織，類似人體的骨骼，自1982年起有些外科醫生已使用珊瑚礁來替代骨頭(Guillemain et al., 1987)。

ICRI(International Coral Reef Initiative)於2016年11月在法國巴黎所舉辦的第31屆大會上宣布2018年是第3次的國際珊瑚礁年(International Year of the Reef, IYOR，前2次分別為1997、2008)。在第1次的年會前的準備期間ICRI即向會員宣示，將於1996之後發起了全球珊瑚礁總體檢計畫(Grigg, 1994)。而台灣地區目前現生珊瑚礁成長較可觀的地區，大致分布在：綠島、蘭嶼、小琉球、澎湖群島、龜山島、東沙與南沙這些離島，以及本島的恆春半島、北海岸、東北角、東部海岸等地(何立德等，2002)。台灣環境資訊協會為中央研究院生物多樣性研究中心外圍組織，自1997年起每年於台灣各地進行台灣珊瑚礁總體檢計畫，其調查方法為生態調查穿越線法(王愛莉，2014)。

由於水體吸收大多數波長的電磁波的特性，淺水水域多採用可見光波段(攝影機及Laser測距儀，一般深度僅達100公尺)、深水水域則多採用聲納進行研究。目前幾乎沒有技術設備可以在水下操作、海水的光學特性強烈影響影像的獲取和視覺化、海水阻斷使用者以衛星和其他無線連接裝置(von Lukas, 2016)。台灣環境資訊協會表示，台灣珊瑚礁總體檢之進行方式，截至2017年為止仍然是採用潛水人員人工目視並進行紀錄。國外相關的調查方式中，除由潛水人員直接目視判釋外，亦有採取先由潛水人員沿等深穿越線攝影後交由海洋生物學家鑑定的方式。

綜上可得知：淺水水域之水下考古、環境教育相關研究主要仍仰賴人工目視、攝影。潛水人員知識的不足(通常為短時間受訓之志工且僅紀錄9項底質及18項左右的指標生物)、水下作業時間則受到潛水人員生理因素的限制、水下紀錄板遺失時礙於資源受限無法重新進行調查。若改由無人載具自動化進行採樣可減少人工判釋的錯誤、可以比人工判釋更多的指標物體、增加水下作業的次數及時間、減少人員的傷亡、並可由不同領域專家針對同一份影像對於其研究領域有效運用，不用每位研究者都要另外安排人員下水。von Lukas (2016)認為諸如安裝、檢測修復水下結構物；探索礦產資源；監測水下文物的狀態等水下應用都可以利用AR(Augmented Reality)以及低價格的ROV(Remotely Operated underwater Vehicle)來達成。例如，日本大學正研究使用ROV來維持管理雨水儲留槽(Fujihara et al., 2016)，俄羅斯研究人員也想要藉由自主式AUV來檢查黑海盆地中油氣管線的洩漏問題及減少人員傷亡(Nyrkov et al., 2017)而義大利也有水下考古(Pruno et al., 2015)以及水下考古場址虛擬潛水的相關研究(Bruno et al., 2017)。

由於資通訊技術的進步、感測器元件的小型化、群眾募資盛行以及開放式軟硬體架構的普及，雖然有已經組裝完成的Mini ROV，但是如果想要另行加裝camera、IMU或其他設備，為了避免破壞原有機體，原則上應以採用自組套件為主。目前市面上販售可自行組裝的小型實驗用微型ROV共有下列3家廠商5種款式：BlueRobotics BlueROV2依線材長度不等價格由USD 2,784至USD 4,663；OpenROV OpenROV 2.8 Kits為USD 899；SeaMate有以下3個系列，SeaMATE TriggerFish ROV Kit (Rev 3)、SeaMATE PufferFish ROV Kit (Rev 7)以及SeaMATE AngelFish ROV Kit (Rev 7)，價格則為USD 190至USD 700。上述套件均以可程式開發版為控制單元，可自行撰寫程式控制ROV的軟、硬體。

以地理學門來看，自然地理使用SfM(Structure from Motion)(Smith, 2015)以及SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)，其原理與航照圖立體對的方式相同，利用多

個攝影機影像位置的不同來辨識深度 / 距離(Stal et al., 2015; Nawaf et al., 2017)。其主要的差別是SfM為結構物或是地景的重建，而SLAM多了即時運算以及預測的功能所以可以作為定位用途使用。Pep Lluís Negre et al., (2014, 2016)提出了AUV(Autonomous Underwater Vehicle)用的Stereo Graph-SLAM方法，這個方法也可以運用於低價格ROV上。傳統的SLAM應用於掃地機器人時在處理路徑規劃和避開障礙物的方法，由於其目的為遍歷整個場域，一般是採用A*演算法(A Star Algorithm)或是啟發式A*演算法(Heuristic A Star Algorithm)來求取最短路徑。但是A*演算法是採取儘量靠近障礙物的做法，由於無法看到海水的流動和海水內波，在不安全的水下環境，並不適合採取靠近障礙物的策略。Blöchliger et al. (2017)以數學分支拓樸學的概念改良了SLAM方法，先將由雙攝影機獲取的SLAM點雲資訊轉化出拓樸圖，再用垂直平分法找出Voronoi解構的可共視點，製作出可供導航使用的導航點凸集合。運用拓樸學改良的SLAM方法在沒有外力的干擾之下可以確保不會撞到障礙物。但是缺點是必須事先取得地真資料，所以無法適用在第一次到訪的陌生環境。由於本研究兼具初次造訪以及重複造訪，穿越線調查法亦有0.5公尺的間隔要求，可以將每個0.5公尺的地點視為1個Node，將拓樸學下可安全通過的「窗口」記錄在Node鏈中，在遭到外力影響產生位移時，回到上一個Node或是下一個Node的地點繼續進行調查。

另外，由於SLAM的位置誤差會隨著時間而產生累積，由前述可知，水中視覺除了光學性質對影像的影響之外，水波的擾動更會擴大位置的誤差。Kasyanov et al. (2017)提出了在地面上除了雙攝影機之外，額外使用慣性量測單元(Inertial Measurement Unit, IMU)基於視覺慣性Keyframe的重新定位方法，這可能有助於水下無人載具的重新定位。Trabes et al. (2017)也提出以Node鏈來進行ROV導航的方法。而法國近幾年來亦有多項進行VR(Virtual Reality)、MR(Mixed Reality)、AR輔助潛水裝置的研究(Domingues et al., 2012; Chouiten et al., 2012, Bellarbi et al., 2013)其多為使用攝影機讀取QR Code(Quick Response Code)後於裝置的螢幕上顯示3D(3 Dimensions)圖形。

UCI Machine Learning Repository: Iris Data Set(2017)提到Anderson於1935從加拿大加斯帕半島上的鳶尾屬花朵中提取的地理變異數據後由Fisher於次年(1936)做為判別分析的一個例子，運用到統計學中。兩人的研究成果為一個Iris flower data set，這個Data set包含了150個樣本，都屬於鳶尾屬下的三個亞屬，分別是山鳶尾、變色鳶尾和維吉尼亞鳶尾。四個特徵被用作樣本的定量分析，它們分別是花萼和花瓣的長度和寬度。基於這四個特徵的集合，Fisher利用多變量分析發展了一個線性判別分析以確定其屬種。這個Data Set成為研究機器學習時常用的Data Set之一。利用Google Tensorflow處理該Data Set有良好的表現，Tensorflow亦在近期分別推出Tensorflow Mobile及Tensorflow Lite等適用於行動裝置和物聯網用的精簡版。在補充相關文獻及Data Set後，應該可以藉由ROV內建的運算單元達成。

第二節 研究目的

本研究主要探討的議題在於如何以有線水下無人載具進行仿效潛水人員執行方式進行半自主化的資料蒐集作業：自行定位、沿穿越線移動100公尺並同時記錄海底底質與出現的生物供研究人員事後製作紀錄 / 報告。再者，受水流及水中生物影響而偏離穿越線時如何回到正確的位置或是規劃新的一條相同 / 不同深度的穿越線。如何重複檢驗同一條穿越線於不同時間 / 時段的調查。有人員監看時提示無人載具當前位置及深度、視覺畫面自動判釋結果供研究人員參考並由研究人員決定是否採用。

本研究希望達成之目標如下：

1. 使用SLAM技術在室內或水下無法接收GNSS(Global Navigation Satellite System)訊號的狀態下，進行空間定位(空間定位)。
2. 使用拓樸學方法或是Node鏈引導：受水流及水中生物影響時回到正確的位置、規劃新的一條穿越線(路徑規劃)、重複進行同一條穿越線於不同時間 / 時段的調查(行程規劃)。
3. 提示無人載具目前相對位置、VR/AR資訊或是AI(Artificial Intelligence)影像自動判釋結果供學習者 / 研究人員參考(自動辨識)。

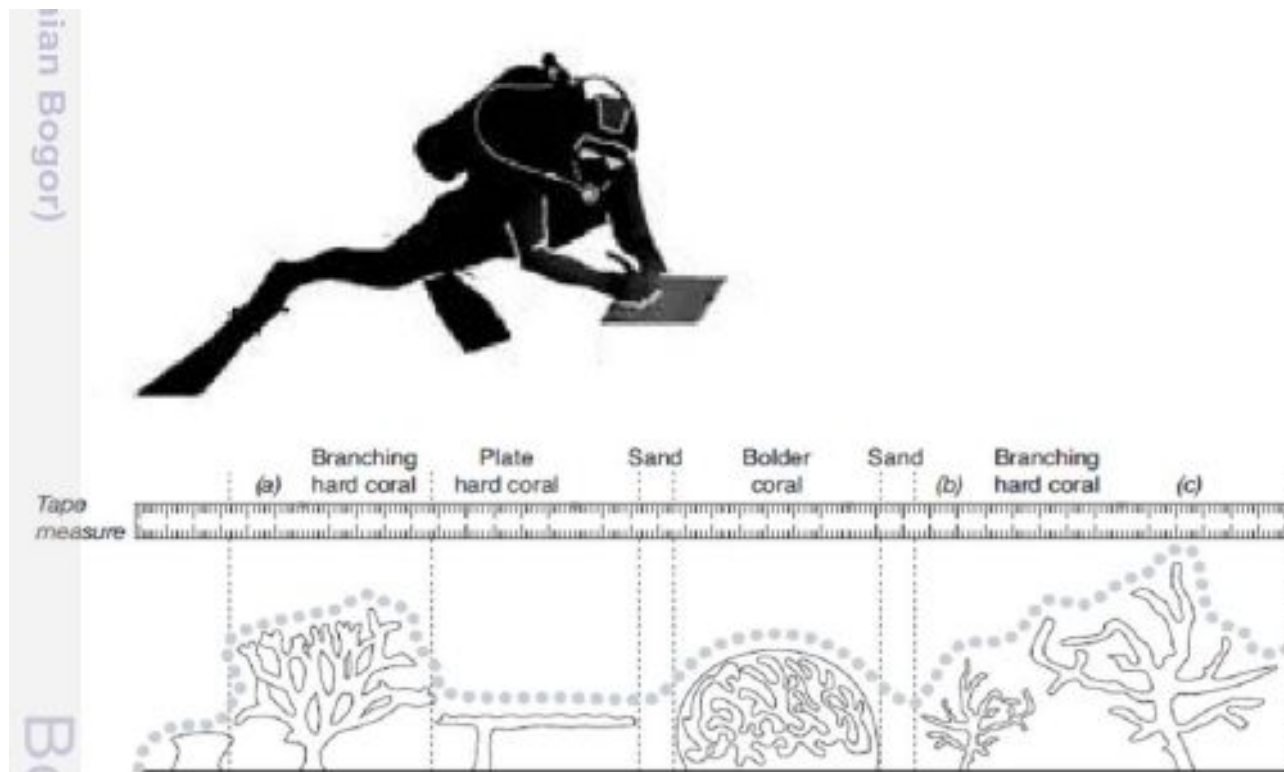
透過以上目標的達成，希望對珊瑚礁生態聚落的環境教育能有更進一步的貢獻；對於淺水域研究人員而言，本研究提供了一套有線無人載具的半自主化資料蒐集模式，使研究者能更安全、更有效率的進行研究。

第二章 文獻回顧

第一節 生態調查穿越線法

一、一般方法

生態調查穿越線法之進行方式為：於平行海岸線5公尺及10公尺之數個不同等深度線處布置長度為100公尺的穿越線後靜待3至5分鐘後，由潛水人員沿穿越線前進並於水下紀錄板上紀錄以穿越線為中心左右寬度各5公尺範圍內的特定魚類、無脊椎動物。由這些海洋生物學家所篩選出來的物種數量可以判斷人類活動對珊瑚礁造成的影響。潛水人員另沿100公尺穿越線，每隔0.5公尺記錄穿越線正下方的海底底質，紀錄其構成物質，究竟是石珊瑚、軟珊瑚、死亡的珊瑚、岩石或沙質海底等，並且在記錄表上逐一填入空格(圖一)。記錄結果經過分析計算以後，便可以算出珊瑚的覆蓋率，並看出這個區域的海底環境特性。除此以外，潛水人員還要記錄調查範圍內的珊瑚有無被炸藥、船錨或潛水者破壞的痕跡、珊瑚有無疾病、白化的比例、海底有無廢棄的魚網或垃圾，甚至垃圾的大小等等細節，這些資料也可以作為評估人類活動對珊瑚礁影響的程度。最後，調查人員還要完成該地點的歷史性描述，說明這個區域在過去是否被人類利用或遭受特殊事件如颱風等(Kusuma, 2016)。

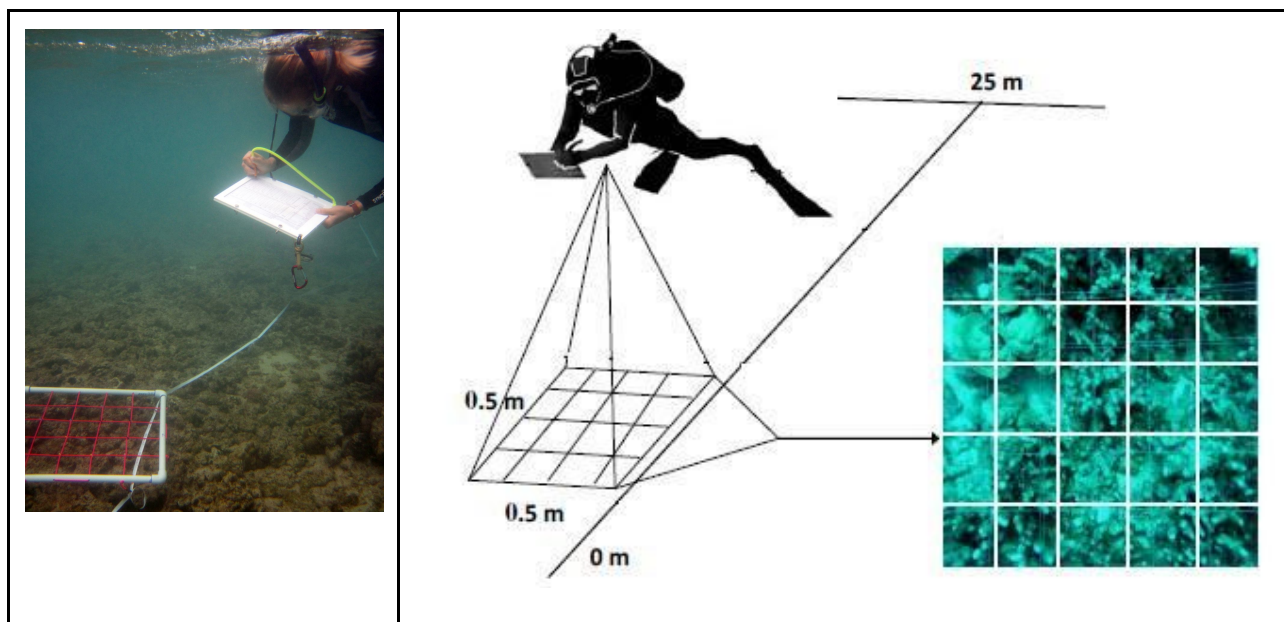


圖一、潛水人員記錄海底底質類型示意圖(KUSUMA, 2016)

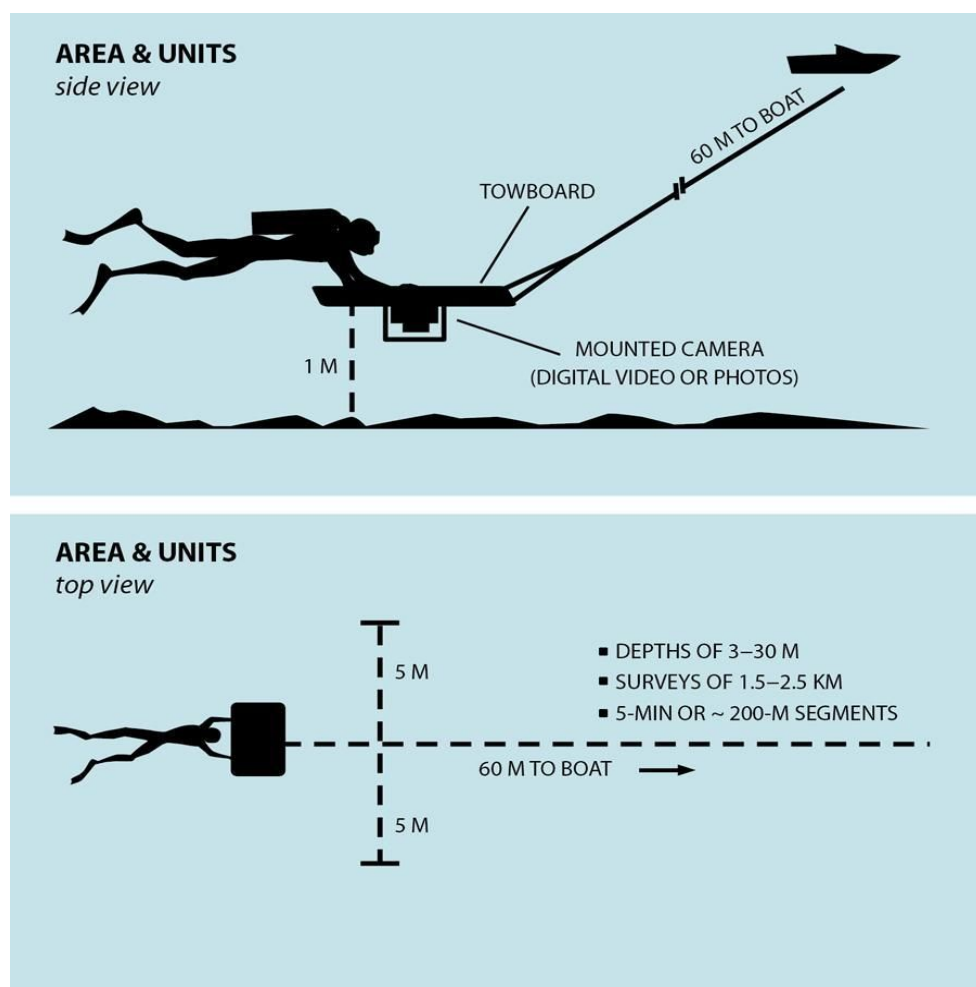
二、因目的不同所採用的變形調查方法

由圖二及圖三所示，100公尺的調查長度並非是固定的，視珊瑚礁聚落分布的型態與範圍，可能縮短調查距離、增加精度，或是增加調查距離。增加精度的方法主要是用來判斷珊

珊瑚的大小；Benthic Towed-diver Survey Method的好處則是水面上的船舶可以接收GNSS訊號取得經緯度等空間資訊，錄影影像副本可以分送給不同的單位使用。



圖二、柵格式調查法。潛水人員攜帶一個50公分見方的柵格，柵格本身由長寬各10公分的小柵格組成，可由珊瑚礁占用的格數判斷珊瑚礁的大小。資料來源：<https://reefwatch.wordpress.com/methods/coral-and-algae-watch/>



圖三、Benthic Towed-diver Survey Method是NOAA自2002年開始使用的調查方法。由小船拖行潛水人員以及錄影設備1.5公里至2.5公里之調查法。資料來源：https://www.pifsc.noaa.gov/cred/survey_methods.php

第二節 SLAM技術與相關軟硬體

SLAM模型主要是依使用照相設備的數量及性能分為：Mono SLAM、Stereo SLAM以及RGB-D等方法(高翔等，2017)。由camera和其他設備取得影像及距離並轉換成點雲(Point cloud)或者是voxel(volume pixel)後進一步來進行地圖繪製。各種方法的差異與相關軟硬體簡述如下：

一、Mono SLAM

Riisgaard and Blas (2003)的專書主要是在討論在ER1機器人上裝設單一camera以及Laser測距儀並使用EKF(Extended Kalman Filter)方法來進行地圖繪製。因為Laser測距儀的單價較高，而且Laser測距儀掃描方式為單次單點掃描或是單次單一平面掃描，需要較精細的解析度時需要等待掃描完畢才能進行移動。

二、Stereo SLAM

Stereo SLAM顧名思義是使用2個camera。其原理是利用視差，由於2個camera的距離和角度已知，可以很容易地計算出觀測物體的大致上的距離。其缺點為這個距離是推估而來，所以會有誤差，而誤差可能會隨著時間的累積擴大。這個時候就需要利用地真資訊、參考點等來進行校正。

三、RGB-D

RGB-D為紅、綠、藍三原色以及景深(Depth)之義。微軟於2013年推出的Kinect 2.0即為知名的RGB-D裝置，其內建了傳統camera、紅外線camera以及景深感測器。學術界中也有許多專供Kinect使用的SLAM Data set，比較可惜的是微軟於2017年10月宣布將停止生產及支援Kinect。由於RGB-D是特製的camera，無法像Mono SLAM或是Stereo SLAM可以採用便宜的Webcam。而且RGB-D camera有探測距離的限制，太近或是太遠的距離都無法辨識(Kinect的有效距離約為0.5 M - 5 M)。

四、IMU

IMU為6個自由度(Degree of Freedom, DoF)的量測工具，分為3個加速度計(Accelerometer)取得x、y、z位移量以及陀螺儀(Gyroscope)用以獲知roll、pitch、yaw等位態空間資訊。有時候也會加入磁力計(Magnetometer)與氣壓計(Barometer)來輔助計算。OpenROV亦提供OpenROV IMU/Compass/Depth Module，內建壓力計將水壓轉換成深度。

五、Robot Operating System

ROS是專為機器人軟體開發所設計出來的一套電腦作業系統架構。它是一個開源的元級作業系統（後作業系統），提供類似於作業系統的服務，包括硬體抽象描述、底層驅動程序管理、共用功能的執行、程序間消息傳遞、程序發行包管理，它也提供一些工具和函式庫用於獲取、建立、編寫和執行多機融合的程序(Joseph, 2015)。ROS雖然名為作業系統，實際上需安裝於Linux作業系統上，ROS內建的Rviz可以將camera的影像用SLAM轉換成3D模型，也可以用來控制開發版或IMU等硬體設備，ROS也提供了API用來和其他程式介接，例如Android、Arduino及Python等。

第三節 演算法

一、拓樸學

拓樸學是數學的一大分支，Leonhard Euler(1735, 1736)提出的「柯尼斯堡七橋問題 (Seven Bridges of Königsberg)」及隔年發表的同名論文是拓樸學的濫觴。其將實際的抽象問題，以可通行的路徑(橋)為線，連通的區域為點的方式化為平面空間上點與線的集合。拓樸學分支的點集拓樸學研究拓樸空間，可以度量空間的概念，將收斂、連通、連續等概念以形式化的數學結構表示。

二、Graph

Graph是由若干給定的頂點(vertex)及連接兩頂點的邊(edge)所構成的圖形，2 vertex是否連通、連通的方向、edge的長度或權值則代表vertex之間的關係。Graph常用在資料的儲存、路徑搜尋、通訊網路以及作業研究等領域。

三、Voronoi Diagram

師範大學匿名作者(2017)的「演算法筆記」網頁中提到，Voronoi發明了Voronoi Diagram。平面空間上的許多點，由鄰近的點之間的中垂線所繪製而成的分界線圖即為Voronoi Diagram。Voronoi Diagram在地理資訊系統中常用來解決鄰近區、最短距離等問題。雖然在理論的計算上是可行，但是實際應用上，Voronoi Diagram只使用於平面，幾乎沒有3維和黎曼幾何的應用。

四、Convex set與可共視點

在點集拓樸學與歐幾里得空間中，凸集(Convex set)是一個點集合，其中每兩點之間的直線點都落在該點集合中。換句話說，如果Node的集合是一個凸集，就代表在任意2點間移動時除了空間中的移動物體之外，絕對不會遇到障礙物。

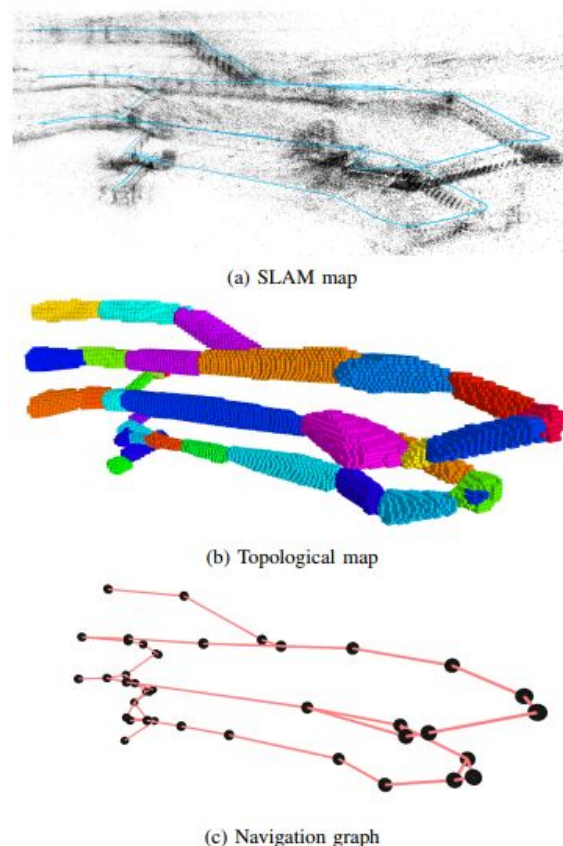
五、鏈結串列

蔡明志(2016)提到，鏈結串列是由許多節點組合而成的，每一個節點皆為結構(structure)，利用結構指標將節點與節點串連起來。這樣的結構稱為自我參考結構，節點結構中需要有一個指向同為節點結構的成員指標。

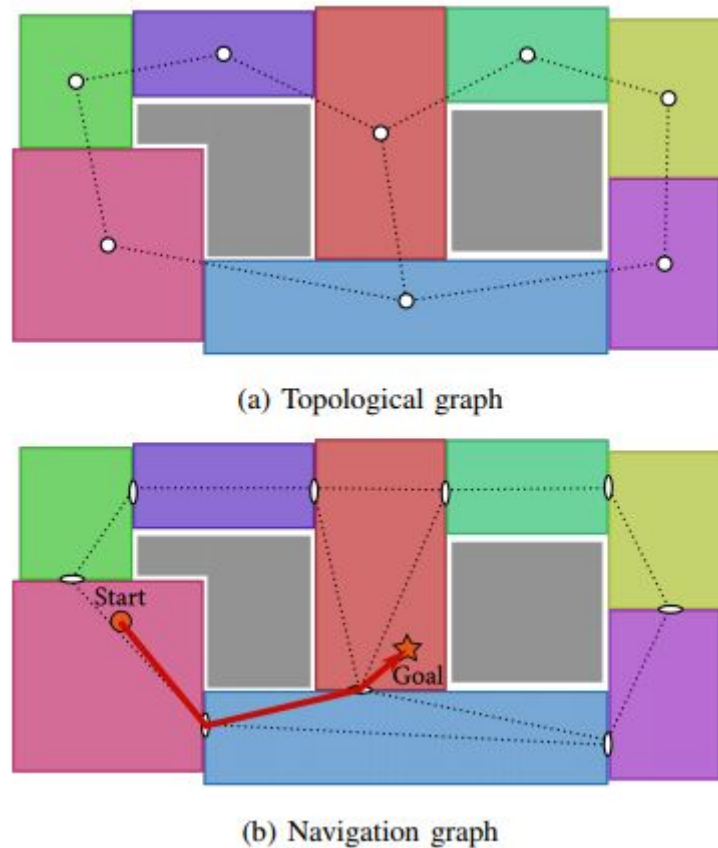
六、雙向鏈結串列

由於鏈結串列只記錄下一個節點的位置，除非從頭進行搜尋，否則無從得知上一個節點的位置。雙向鏈結串列則增加一個成員指標紀錄上一個節點(謝樹明，2012)。如此一來在任一節點都可以得知前一個節點及下一個節點的位置。

Blöchliger et al. (2017)以數學分支拓樸學的概念改良了SLAM方法，先將由雙攝影機獲取的SLAM點雲資訊後(圖四(a))，利用影像處理中常用的「膨脹」將點雲Voxel化充滿整個空間並分為許多不同的cluster(圖四(b))，再對每個cluster的質心用垂直平分法找出Voronoi解構的可共視點Voronoi Diagram。然後，並不是以clusters的質心(圖五(a)中的白色圓點)而是以可共視點Voronoi Diagram的Portals(圖五(b)中的白色橢圓點)做為Node(圖四(c)中的黑點)轉化出拓樸圖，製作出可供導航使用的導航點凸集合。



圖四、(a)SLAM點雲；(b)點雲Voxel膨脹為空間clusters後的拓樸圖；(c)以Portals做為Node的導航用凸集。



圖五、(a)以clusters質心呈現的Voronoi Topological圖；(b)計算出可共視點portals呈現的Voronoi導航用凸集，可以看出由任何一個portal前往相鄰的任何portal絕對不會遇到碰撞。

綜合以上的演算法，可以先將想要前往的200個地點群(Interest Points, Point of interest, POIs)轉換成vertices也就是Node集合，並藉由控制深度將6 DoF降維成為3 DoF(3D轉2D)。再以Voronoi Diagram來計算vertex之間的最短距離，最後以Portals組成的Convex set來修正Node-chain(Trabes et al., 2017)路線實現碰撞偵測來進行robot的路徑規劃。因為本研究理論上為一條近乎直線的曲線，沒有必要處理最佳路徑搜索。只要像公車或是捷運一般前往下一站，並在過多節點訪問失敗的時候取消接下來的訪問行程。

第四節 VR與AR

Rosenberg(1992, 1993)提出用虛擬紋理圖層來輔助遠端操縱robot是最早關於AR的論文。Paul Milgram and Fumio Kishino(1994)提出的圖六的現實-虛擬連續統(Milgram's Reality-Virtuality Continuum) 將MR區分為AR、AV(Augmented Virtual)以及VR。而法國近幾年來亦有多項輔助潛水裝置的研究(Domingues et al., 2012; Chouiten et al., 2012, Bellarbi et al., 2013)。所以VR、AR可以提供人類感知範圍之外的資訊或是在任何不利於人類生存的環境進行遠隔操作。



圖六、現實-虛擬連續統(Milgram's Reality-Virtuality Continuum)。將真實環境和虛擬環境分別作為連續系統的兩端，位於它們中間的被稱為「混合實境」。其中靠近真實環境的是擴增實境（Augmented Reality），靠近虛擬環境的則是擴增虛境。

綜合以上四節的介紹，本研究預期在需要人員介入進行操作的Mini ROV上加入路徑規劃演算法以及輔助用的空間資訊及導覽資訊。

第三章 研究方法

第一節 概述

本研究欲解決三大課題：

針對不同研究對象及步驟，本研究使用不同方法及工具，分述如下：

一、導覽物件屬性抽取及分類：

從相關文獻中，採取文獻分析法、現地調查法、潛水人員生態調查穿越線法，了解潛水人員的空間行為、潛水人員的調查行為與調查內容的關係，從中抽取基本的導覽物件屬性。基本的導覽物件分為導覽的路徑及內容；而路徑可分為經過區間(segment)及停留點；內容則有觀測者的位置及位態、觀測前景及背景。

二、Mini ROV半自主控制系統的建構：

本研究將以開放式ROV平台為硬體架構，加裝IMU以取得x、y、z位移量以及roll、pitch、yaw位態空間資訊。以Linux及ROS(Robot Operating System)為軟體操作平台，Stereo SLAM為地圖繪製及定位方法。ROS中的Rviz即可將SLAM進行3D可視化，並藉由ROS透過IMU取得的空間資訊來控制ROV。

三、路徑規劃演算法及AR資訊的建構：

由於使用濾波器方法，其位置誤差會隨著時間的累積而擴大，本研究將採用Graph優化並以Node-chain方法進行路線規劃，以拓樸學方法及可共視點避免碰撞的發生，並即時顯示ROV目前水深、相對位置、位態、調查行進路徑、經過時間等基本資訊。並保留擴增接口，未來可與海底底質、魚類、軟體動物等27項指標之自動辨識系統介接。由於部分開發版的作業系統中內建Python程式語言，這個自動辨識系統可以透過Python加上Tensorflow API來實作，並透過ROS提供的接口將辨識結果反饋給觀測人員。

第二節 研究區範圍

北海岸及東北角地區為台灣珊瑚生長的最北界，而珊瑚生長的範圍則為水深30公尺以內的範圍，野柳地質公園的管轄範圍僅於等深線20公尺的範圍內。所以，本研究的研究區除了野柳地質公園園區外，亦可能在安全確保之下在野柳近海及鄰近海港處進行實驗。

第三節 預期成果

野柳地區每年10月到4月盛行東北季風，水下風浪較強，5、6月為梅雨季節，6月至9月則為比較弱的西南風，但是由於生態線調查方法僅需探查100公尺左右的範圍，單次實際作

業時間費時5至10分鐘。本研究預期在風浪較小的期間，以ROV自主進行珊瑚礁水域的生態線調查方法，待調查次數達到一定數量後交由專家評估取代潛水人員人工作業，提升未來調查效率、降低成本並減少人員傷亡。

第四節 未來研究方向

由於物體辨識並非本研究的主要研究內容，本系統保留開放式的接口進行介接。除了本研究的27項指標物體之外，也可以介接水下工程、管線、水生生物等專業的AR資訊，建議未來可由相關領域人員開發專業的物體辨識系統。

參考文獻

中文

王愛莉 (2014) 「台灣珊瑚礁體檢」應用於海洋保育教育之探討, **國立臺灣師範大學環境教育研究所碩士論文**, 台北市。

台灣環境資訊協會 (2017) 珊瑚礁體檢計畫 <http://teia.tw/zh-hant/seawatch/about> (截取日期 : 2017.11.17)

何立德、王鑫、戴昌鳳 (2002) **臺灣的珊瑚礁**, 台北縣新店市: 遠足文化。

東亞野生生物貿易研究委員會TRAFFIC East Asia (2017)

<http://www.wow.org.tw/traffic/archives/270> (截取日期 : 2017.11.17)

高翔、張濤等著 (2017) **視覺SLAM十四講：從理論到實踐**, 北京: 電子工業出版社。

演算法筆記 (2017) <http://www.csie.ntnu.edu.tw/~u91029/VoronoiDiagram.html> (截取日期 : 2017.12.15)

蔡明志 (2016) **戰勝C語言**, 台北市: 碁峰資訊。

謝樹明 (2012) **細談資料結構**, 台北市: 旗標出版。

日文

Fujihara, A., Kasai, T., Imai, T., Nakayama, Y. (2016) Bluetooth Low Energy を用いた雨水貯留槽内における水中ロボットの位置測位. **福井工業大学研究紀要**, 第46号.

英文

Bellarbi, A., Domingues, C., Otmane, S., Benbelkacem, S., Dinis, A. (2013) Augmented reality for underwater activities with the use of the DOLPHYN. **2013 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)**, 409-412.

Blöchliger, F., Fehr, M., Dymczyk, M., Schneider, T., Siegwart, R. (2017) Topomap: topological mapping and navigation based on visual SLAM maps. *ArXiv: 1709.05533v1 [cs.RO]*.

BlueRobotics (2017) <https://www.bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/> (截取日期 : 2017.12.15)

Brono, F., Lagudi, A., Barbieri, L., Muzzupappa, M., Mangeruga, M., Pupo, F., Cozza, M., Cozza, A., Ritacco, G., Peluso, R. (2017) Virtual diving in the underwater archaeological site of Cala Minnola. **ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, : 121-126.

Chiuiten, M., Domingues, C., Dider, J.-Y., Otmane, S., Mallem, M. (2012) Distributed mixed reality for remote underwater telerobotics exploration. **the 2012 Virtual Reality International Conference**.

Chouiten, M., Domingues, C., Didier, J.-Y., Otmane, S., Mallem, M. (2014) Distributed Mixed reality for diving and underwater tasks using Remotely Operated Vehicles. **International Journal on Computational Sciences & Applications**, 5(4).

- Coral guardian (2017) <https://www.coralguardian.org/en/coral-reef-important/> (截取日期 : 2017.11.17)
- Domingues, C., Essabbah, M., Cheaib, N., Otmame, S., Dinis, A. (2012) Human-Robot-Interfaces based on Mixed Reality for Underwater Robot Teleoperation. *IFAC*, 45(27): 212-215.
- Domingues, C., Otmame, S., Dinis, A. (2012) Poster: a new device for virtual or augmented underwater diving. *IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*.
- Grigg, R. W. (1994) The International Coral Reef Initiative: conservation and effective management of marine resources. *Coral Reefs*, 13(4): 197-198
- Guillemin, G., Patat, J. L., Fournie, J., Chetail, M. (1987) The use of coral as a bone graft substitute. *Journal of Biomedical Materials Research*, 21(5): 557-567.
- International Concrete Repair Institute (ICRI, 2017) <https://www.icriforum.org/about-icri/iyor> (截取日期 : 2017.11.17)
- Joseph, L. (2015) *Mastering ROS for robotics programming*. Packt Publishing Ltd.
- Kasyanov, A., Engelmann, F., Stückler, J., Leibe, B. (2017) Keyframe-based visual-inertial online SLAM with relocalization. *arXiv: 1702.02175v2 [cs.CV]*.
- Kusuma, H. A. (2016) Pengembangan Instrumen Berbasis Arduino Sebagai Pencatat Lifeform Dan Genus Karang. *Master thesis, Bogor Agricultural University (IPB), Indonesia*.
- Nawaf, M.M., Drap, P., Royer, JP., Merad, D., Saccone, M., (2017) Towards Guided Underwater Survey Using Light Visual Odometry. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, : 527-533.
- NOAA (2017) www.noaa.gov/oceans-coasts (截取日期 : 2017.11.17)
- OpenROV (2017) <https://store.openrov.com/products/openrov-v2-8-kit> (截取日期 : 2017.12.15)
- Pep Lluís Negre, C., Francisco, B.-F., Gabriel Oliver, C. (2016) Stereo Graph-SLAM for Autonomous Underwater Vehicles. *Intelligent Autonomous Systems 13: Proceedings of the 13th International Conference IAS-13*, :351-360.
- Pruno, E., Marcotulli, C., Vannini, G., Drap, P. (2015) Underwater photogrammetry methods for a peculiar case-study: San Domenico (Prato-Italy). *Int. Arch. Photogramm Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, : 171-176.
- Riisgaard, S., Blas, M. R. (2003) SLAM for Dummies: A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping. 1-127.
- Rosenberg, L.B. (1992) The Use of Virtual Fixtures As Perceptual Overlays to Enhance Operator Performance in Remote Environments. *Technical Report AL-TR-0089*, USAF Armstrong Laboratory, Wright-Patterson AFB OH, 1992.

- Rosenberg, L.B. (1993) Virtual Fixtures: Perceptual Overlays for Telerobotic Manipulation. *In Proc. of the IEEE Annual Int. Symposium on Virtual Reality (1993)*: pp. 76-82.
- SeaMATE (2017) <https://seamate.org/collections/rov-kits> (截取日期 : 2017.12.15)
- Smith, M. W., Carrivick, J.L., Quincey, D.J. (2015) Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Physical Geography*, 40(2): 247- 275.
- Stal, C., Deruyter, G., Paelinck, M., Vandenbulcke, A., De Wulf, A. (2015) Towards cost-efficient prospection and 3D visualization of underwater structures using compact ROVs. *15th International multidisciplinary scientific GeoConference (SGEM 2015)*, : 1211-1218
- Trabes, E., Jordan, M. (2017) A Node-Based Method for SLAM Navigation in Self-Similar Underwater Environments: A Case Study. *Robotics*, 6(4): 29.
- UCI Machine Learning Repository: Iris Data Set <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/iris> (截取日期 : 2018.01.07)
- USGS (2017) <https://www.usgs.gov/> (截取日期 : 2017.11.17)
- von Lukas, U. F. (2016) Underwater visual computing: the grand challenge just around the corner. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 36(2): 10-15.
- WWF (2017) http://wwf.panda.org/about_our_earth/blue_planet/coasts/coral_reefs/ (截取日期 : 2017.11.17)