

Quantification and Analysis of 3D Structure of Coral Reefs

Guan-Yan Chen ¹ Cheng-Feng Dai ^{2*}

¹ Master, Institute of Oceanography, National Taiwan University

² Professor, Institute of Oceanography, National Taiwan University,

ABSTRACT

The structural complexity of coral reefs which is essential for maintaining their high biodiversity and ecosystem functions can be a good indicator for assessing their healthy status. However, it is very difficult to quantify the structural complexity of coral reefs efficiently by traditional methods. Recently, the Structure from Motion (SfM), a low-cost photogrammetric method, has been increasingly applied to generate 3D models of coral reefs with high resolutions. Herein we introduce the standard protocols of applying SfM in underwater survey and quantitative analysis at Chaojing and Wanlitong reefs. The results of 3D models reveal the differences in structural complexity of benthic features and can be used to assess the impacts of marine activities on coral reefs. Besides, drones can also be used to survey the structural complexity of coral reefs in a larger area. In a smaller scale, photographs of a coral colony taken in lab or field can be used to generate 3D models in high resolutions. The 3D models can be used not only for quantitative analysis but also for public education and exhibitions. With the improvement of hardware and data accumulation in the future, the SfM methods will have high potential in marine ecological survey, ecosystem monitoring and conservation,

Keywords: 3D model, coral reef, structural complexity, structure from motion.

* Corresponding author, E mail: corallab@ntu.edu.tw

珊瑚礁立體結構的量化與分析

陳冠言¹ 戴昌鳳^{2*}

¹ 國立台灣大學海洋研究所研究生

² 國立台灣大學海洋研究所教授

摘要

珊瑚礁的結構複雜度與其生態功能和生物多樣性息息相關，也是珊瑚礁健康狀態的代表性指標。然而，傳統方法很難客觀且有效率的對珊瑚礁的立體結構進行調查和評估；近年來興起的運動恢復結構(Structure from Motion, SfM)技術，是基於影像的低成本方法，能產生毫米等級的珊瑚礁三維模型。本文旨在介紹運用 SfM 方法於水下調查的作業流程及量化分析方法，並以基隆潮境和恆春萬里桐的珊瑚礁調查與三維建模為例，結果顯示能區分不同珊瑚群體及礁體的結構複雜度，用於評估人為擾動的影響。此外，也可以利用空拍機拍攝大範圍的礁體結構，或在實驗室中進行高解析度的珊瑚體影像拍攝，產生的三維模型可用於量化分析，也可應用於各種展示和科普教育。未來隨著資料的累積與硬體的進步，在海洋環境調查、生態保育和監測上將有很大的發展潛力。

關鍵詞：三維模型、珊瑚礁、結構複雜度、運動恢復結構(SfM)

* 通訊作者 E mail: corallab@ntu.edu.tw

一、前言

珊瑚礁生態系最顯而易見的特徵就是結構複雜度(structural complexity)，造礁珊瑚藉由生長和堆積碳酸鈣骨骼形成複雜而多樣的立體結構，提供許多海洋生物棲息、繁殖或覓食的場所，不僅有助於維持生物多樣性，也貢獻許多生態系服務(Graham & Nash, 2013)，因此了解珊瑚礁的結構複雜度與珊瑚體的形態組成，有助於詳細評估珊瑚礁生態系的健康狀態，是進行生態評估與監測的重要指標。

由於珊瑚礁的立體結構非常複雜，量化十分困難，因此傳統文獻大多使用等級分類法，例如將結構複雜度分為三至五等級，分別給予不同定義，由潛水調查人員依目視情況判別(Wilson et al., 2007)，但這種方法難免有過於主觀及簡化之嫌；比較客觀的量化方式是使用穿越線或以深度計繪製測線的橫剖面，進行線性粗糙度(rugosity)分析(Dustan et al., 2013)，然而此法卻很耗時費力，而且調查範圍狹窄；此外，對於珊瑚礁立體結構的量測，以往多使用蠟包埋法計算表面積和體積，但此作法會造成珊瑚體死亡。一般市售的三維掃描儀則不適用於野外環境。

近年來，使用「運動恢復結構」(Structure from Motion, SfM) 的技術已被應用於量化珊瑚礁的立體結構(Burns et al., 2015)。SfM 是一種基於影像、非破壞性的三維建模方法，藉由密集拍攝高度重疊(>70%)的影像，分析個別照片中的特徵點，並透過三角運算得出三維空間資訊，可以產生包含顏色資訊的高解析度三維模型。此方法僅需取得合適的影像資料，具有操作簡便、成本低、容易推廣使用等優勢，目前有許多軟體(例如: Agisoft Metashape、Pix4D、3Dsurvey、VisualSFM)能進行有關的運算。

SfM 技術已被應用於諸多領域，例如：在林業上，用於分析樹木的分枝體系結構(Morgenroth & Gómez, 2014)，也可應用於航拍圖或衛星照片的分析，以呈現地表的高程變化 (Fonstad et al, 2013)；在水下考古領域，可用於沈船或古物的量測及文物的保存(McCarthy & Benjamin, 2014)，或補充聲納難以測量的結構(Robert et al., 2017)；也可應用於空拍機拍攝的海洋哺乳動物照片，量測其體積變異(Hodgson et al., 2020)，有助於族群調查。在珊瑚礁調查和監測方面，美國 Scripps Institution of Oceanography 的 100 島嶼挑戰計畫(<http://100islandchallenge.org/>)，已利用三維模型紀錄太平洋許多島嶼的珊瑚礁狀況，是值得參考的範例。

二、三維建模流程與分析方法

三維建模的材料來自於影像資訊，因此需要注意影像品質與拍攝方式。在較大範圍棲地尺度的取樣，通常使用垂直角度及牛耕式路徑拍攝(圖 1)，這種做法有利於標準化作業流程，並且增進工作效率；在較小範圍珊瑚體尺度的取樣，則使用多角度的

環繞式拍攝(圖 2)，可以產生更接近真實的模型。至於影像品質，則會受環境條件(如：濁度、光照)與設備(如：相機畫素、感光元件)的影響；影像品質愈佳，三維建模的結果也愈好。

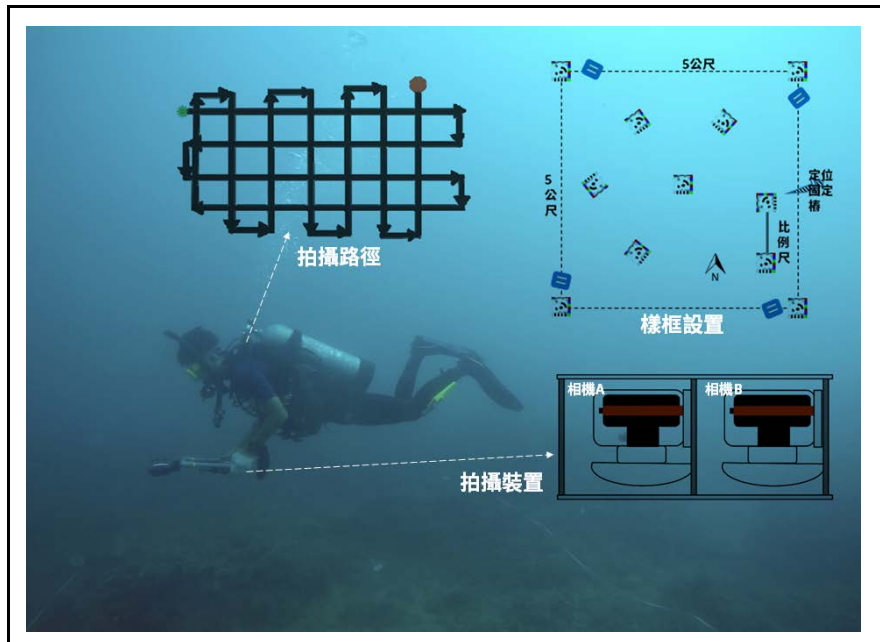


圖 1 水下攝影取樣方法。

(以捲尺和鉛塊設置 5 x 5 m 的樣框，並在其中均勻散佈地面控制點，用於設置比例尺及在地座標系，拍攝裝置使用兩台串聯的相機，分別設定不同的焦距以捕捉不同解析度的影像，拍攝角度垂直於地面，並以牛耕式路徑拍攝，確保樣框內所有面積都能被均勻的拍攝到。)

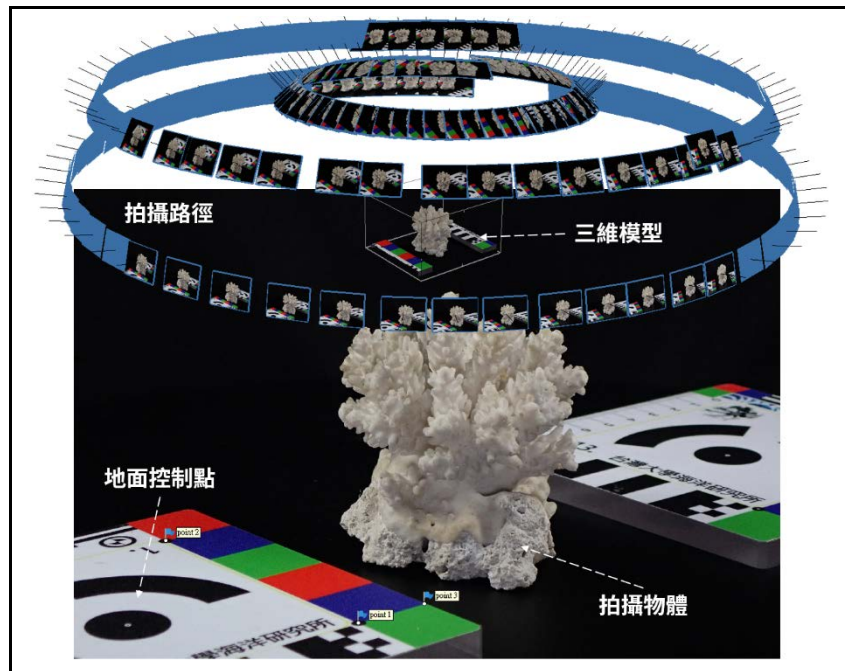


圖 2 小範圍珊瑚體尺度多角度的環繞式拍攝示意圖

(以多角度環繞式路徑拍攝，相片拍攝密度愈高，可以獲得愈接近真實的三維模型。)

水下攝影取樣流程大致可分為三個步驟，(一)相機設置：使用兩台串聯的防水相機，分別設置不同焦距以捕捉不同解析度的影像，同時進行間隔攝影；(二)樣區佈置：以捲尺和鉛塊建立暫時的樣框，並於樣框內均勻散佈地面控制點(ground control points, GCPs)；(三)攝影取樣：維持在固定水深，保持穩定的速率，均勻地拍攝高度重疊的相片(圖 1)。在 5 x 5 m 的樣框內約需拍攝 800~1000 張照片，依底質環境的複雜度可以有所增減，總耗時約 20~40 分鐘，足夠在一支氣瓶的潛水時間完成。

拍攝所得照片經刪除模糊或有干擾物的影像，即可匯入三維建模軟體，本研究使用 Agisoft Metashape (2019 年前原名 Photoscan)，主要操作流程包括下列五個步驟：(一)校正相片(align photo)，分析相片的拍攝位置與角度，並根據影像中的特徵計算關鍵點；(二)產生密集點雲 (dense cloud)，根據校正相片的結果，產生許多包含三維空間資訊的密集點；(三)建立多邊形網格模型 (mesh model)，密集點雲經由內插法運算，產生具有頂點和面數的三維模型 (圖 3)；(四)在地座標系設置：使三維模型能符合實際的比例；(五)輸出數值高程模型(digital elevation model, DEM)及正射影像鑲嵌圖(orthomosaic)：DEM 是簡化的三維模型，能反映珊瑚礁區的高低變化，正射影像鑲嵌圖是經過幾何校正的相片，能用於計算珊瑚群體的絕對面積。

三維模型的量化分析，在研究珊瑚礁棲地複雜度方面，由於資料量大，目前多使用 DEM，以 GIS 軟體(ArcGIS、QGIS)分析具有生態意義的空間參數，例如：斜度(slope)、

線性粗糙度(linear rugosity，即實際長度與幾何長度的比值)、VRM (Vector Ruggedness Measure，綜合考量斜度及坡向和鄰近單元的差異)(圖 4)。

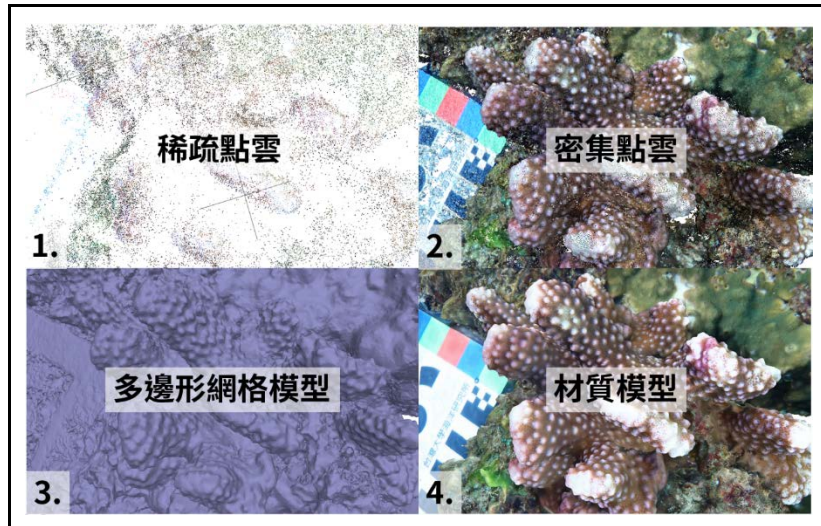


圖 3 三維模型建立過程。

(1)校正相片後產生稀疏點雲；(2)產生密集點雲即可看出接近真實物體的外觀；(3)多邊形網格模型則是密集點雲經過內插法運算產生三角形網格的結果；(4)經由材質運算能使模型產生更接近真實的外觀顏色。

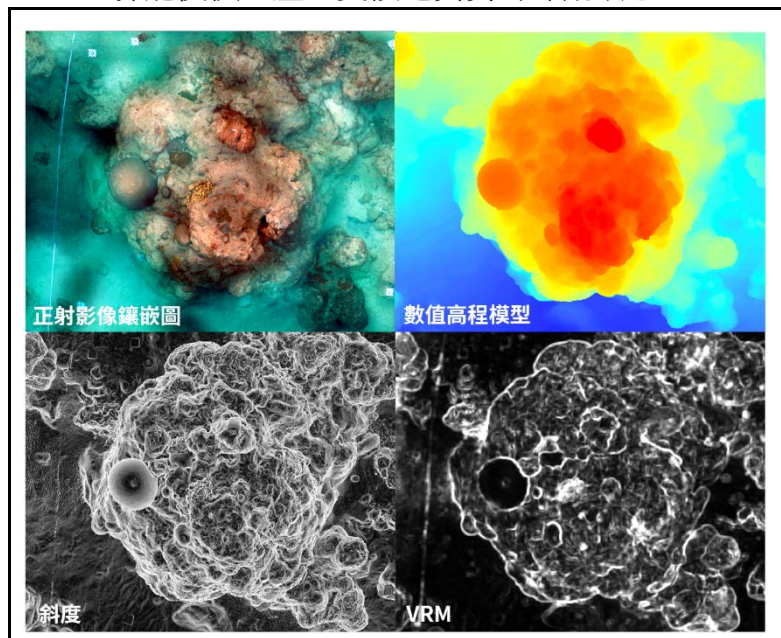


圖 4 三維模型視覺化資料(以萬里桐水下 5 x 5 m 珊瑚礁樣區為例)

(1)正射影像鑲嵌圖(orthomosaic)即幾何校正過的垂直投影照片；(2)數值高程模型，不同顏色代表不同高度變化；(3)斜度，可反映地貌的起伏；(4)VRM，亮度愈高代表地貌愈粗糙。

三、結果與討論

本研究分別在(一)基隆市潮境海灣資源保育區，設立 1 x 1 m 樣區，拍攝影像，分析不同珊瑚體及底質對整體棲地結構複雜度的貢獻；(二)恆春半島西岸的萬里桐珊瑚礁，設立 5 x 5 m 樣區，拍攝影像，比較人為擾動對棲地複雜度的影響。在相片覆蓋率介於 13 ~ 32 張/m²的條件下，產出的三維模型可達到 0.9 ~ 1.1 mm/pix 的解析度，獲得毫米等級的 DEM，足以區別不同珊瑚體的形態。

在基隆潮境的調查結果顯示，葉片形與分枝形珊瑚的結構複雜度(VRM= 0.3 ~ 0.4、Rugosity > 3、Slope > 3000) 明顯較高，表覆形和團塊形珊瑚的結構複雜度則較低(VRM < 0.15、Rugosity < 2、Slope < 1500)，裸露的礁岩與藻類則介於兩者之間。由此可知，構造較複雜的珊瑚體是棲地複雜度的主要貢獻者，而三維建模的量化方式能精準而客觀的區別珊瑚體結構複雜度的差異。

在恆春萬里桐總計完成 10 個樣區的調查，依據樣區與入水點的距離，可分為近入水點(n = 6)與遠入水點(n = 4)等二組。兩組礁區的活動人數比例約為 3 : 1。三維模型分析結果顯示，近入水點礁區的棲地複雜度(VRM = 0.09 ± 0.01)比遠入水點(VRM = 0.16 ± 0.02)明顯較低，顯示海域人為活動會破壞脆弱的珊瑚體，導致礁體結構趨於單調。本研究也嘗試使用空拍機在該海域珊瑚礁區拍攝的影像，建立水下珊瑚礁三維模型(圖 5)，在合適的水文與天候條件下，可取得解析度甚高的成果。

珊瑚礁的三維模型也可應用於環境教育和展示，讓一般民眾在陸上即可了解水下珊瑚礁生態系的仿真立體結構。國外已有許多研究者透過網路展示成果，例如美國夏威夷大學的 Dr. John H.R. Burns 所建立的 Sketchfab 網站(<https://sketchfab.com/johnhrburns>)即有豐富內容。未來隨著 AR (擴增實境)和 VR (虛擬實境)技術的發展，展示三維模型的方法將會更多樣而簡便。

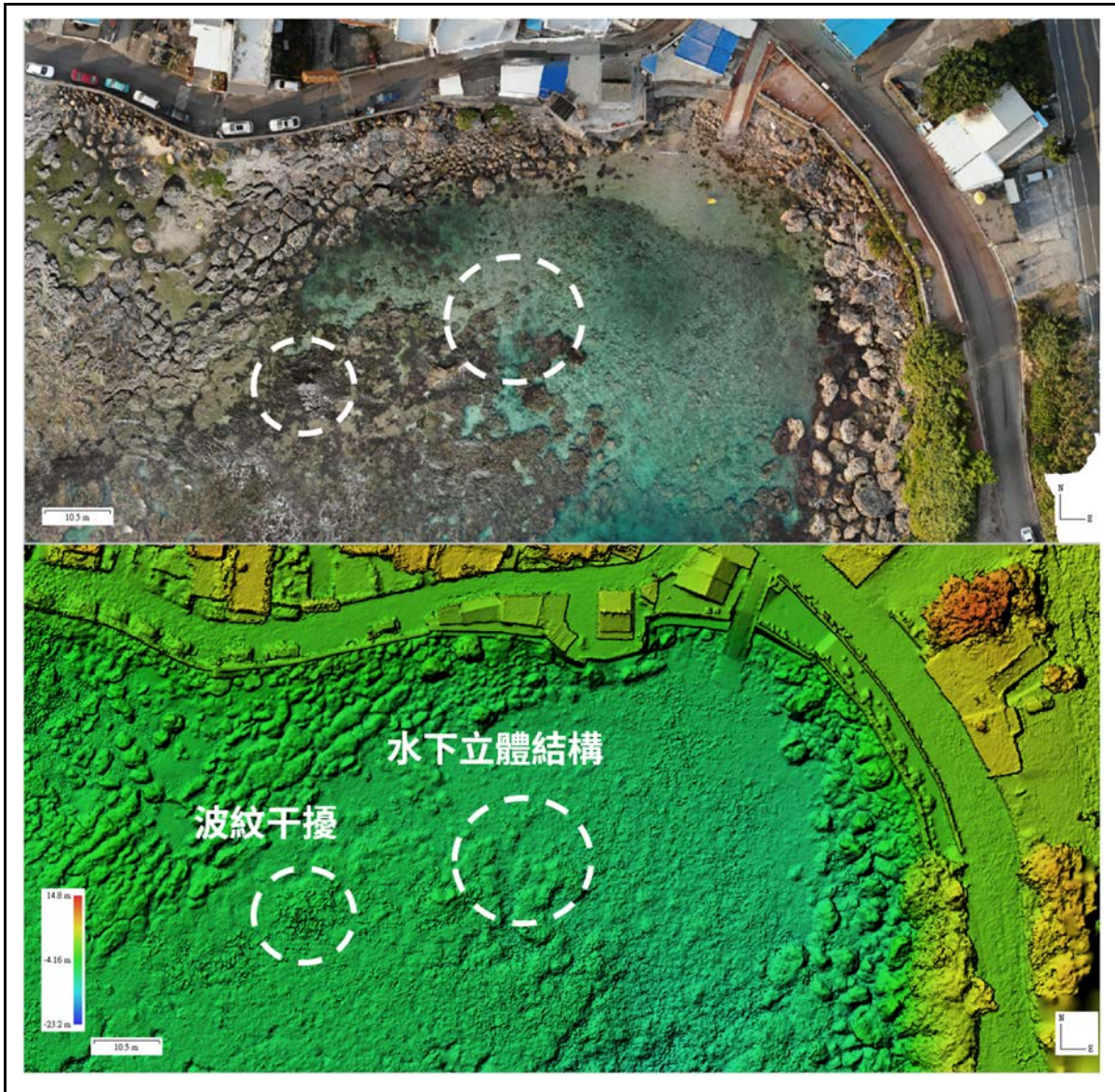


圖 5 恆春萬里桐的正射影像鑲嵌圖(上)與 DEM (下)

使用空拍機在 60 m 高度拍攝 490 張照片，可產生解析度達公分等級、能辨識水下立體結構的 DEM，表面粗糙處則是受風浪干擾所致，添加偏光鏡及慎選拍攝時的天候可降低干擾。

四、結論

運用基於影像的 SfM 三維建模技術，具有成本低、操作方便等優勢，在適當的條件下，可取得毫米等級的三維模型，足以辨識珊瑚礁生態系的細微立體結構。經由量化取得的數值資料，可用於分析珊瑚體形態組成，以及評估人為擾動的影響，適合做為評估珊瑚礁生態系現況的指標。此外，三維模型與視覺化資料能詳細紀錄珊瑚礁生態，也可做為科普推廣的素材。這些方法都可應用於其他海洋生態系，包括海草床、紅樹林、藻礁和深海底棲生態系的調查和監測。若能累積長期的數值資料，則可進行生態系變動趨勢分析或數值模型相關研究，也可做為生態系復育的重要參考。未來隨著相關硬體和軟體的發展，SfM 三維建模技術在海洋生態評估、保育和復育的應用，將會更廣泛，且有重要科學意義。

誌 謝

感謝台大海洋所 Dr. Vianney Denis 和國立海洋生物博物館樊同雲研究員的寶貴建言，以及台科大水上活動社的野外調查協助。特別感謝行政院海洋委員會和黑潮海洋文教基金會提供的經費贊助。

參考文獻

- [1] Burns, J., Delparte, D., Gates, R. and Takabayashi, M. (2015), Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs, *PeerJ*, Vol. 3: e1077
- [2] Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L. and Carbonneau, P. E. (2013), Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 38, pp. 421-430
- [3] Graham, N. and Nash, K. (2013), The importance of structural complexity in coral reef ecosystems, *Coral Reefs*, Vol. 32, pp. 315-326.
- [4] Hodgson, J. C., Holman, D., Terauds, A., Koh, L. P. and Goldsworthy, S. D. (2020), Rapid condition monitoring of an endangered marine vertebrate using precise, non-invasive morphometrics, *Biological Conservation*, Vol. 242, 108402.
- [5] McCarthy, J. and Benjamin, J. (2014), Multi-image photogrammetry for underwater archaeological site recording: an accessible, diver-based approach, *Journal of Maritime Archaeology*, Vol. 9, pp. 95-114.
- [6] Morgenroth, J. and Gomez, C. (2014), Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique-A proof of concept, *Urban Forestry & Urban Greening*, Vol. 13, pp. 198-203.
- [7] Robert, K., Huvenne, V. A., Georgiopoulou, A., Jones, D. O., Marsh, L., Carter, G. D. and Chaumillon, L. (2017), New approaches to high-resolution mapping of marine vertical structures, *Scientific Reports*, Vol. 7, pp. 1-14
- [8] Wilson, S. K., Graham, N. A. J. and Polunin, N. V. C. (2007), Appraisal of visual assessments of habitat complexity and benthic composition on coral reefs, *Marine Biology*, Vol. 151, pp. 1069-1076.
- [9] Zawada, K. J. A., Dornelas, M. and Madin, J. S. (2019), Quantifying coral morphology, *Coral Reefs*, Vol. 38, pp. 1281-1292.