

【研究報告】

從考古學的角度論3D掃描與逆向輸出在出土人骨的應用： 以亮島人為例

Applications of 3D Scanning and Reverse Engineering in Archaeology: A
Case Study on the Reconstruction of “Liangdao Man”

邱鴻霖* (Chiu Hung-lin)

■ 摘要

3D掃描技術與逆向輸出工程的應用掀起了一波新的全球技術革命。今日，這項技術在考古學上的運用層面已從考古現場記錄、虛擬實境重建到文物複製等，幾乎肉眼視覺所及無所不包。考古學在這波潮流之中應該如何看待這項技術的發展？在不同的考古學研究中，又該如何善加利用這項技術藉以創造新的視野與知識。本文著重於探討考古遺址中出土墓葬與人骨時，如何以3D掃描與RP逆向輸出做為一個新媒介以取代傳統方法，並以馬祖出土亮島人1號的3D掃描與逆向輸出過程為例，從遺址的現場發掘、墓葬人骨的記錄方式、人骨修復、RP逆向輸出、仿真表現、博物館展示倫理等議題進行討論，並嘗試以考古學的角度出發，來省視這項新發展在技術應用上、知識生產上的優勢，與其尚待發展之處。

關鍵詞：考古學、體質人類學、3D掃描、逆向輸出、亮島人

*國立清華大學人類學研究所專任助理教授 (chiu_alex@hotmail.com)

收件日期：2014/ 8 / 20；接受日期：2014/ 10 / 13 Received Date:2014/ 8 / 20； Accepted Date:2014 / 10 / 13

■ **Abstract**

Application of 3D scanning and reverse engineering is stirring a wave of technological revolution. Today, the application of this technology has been used in the archaeological researches - from archaeological field works and virtual reality simulation to replica productions - for nearly all objects visible. In this wave of trend, how should archaeology look upon the development of this technology? How should archaeological studies in different aspects make proper uses of this technology in order to create a new vision and knowledge? This paper focuses on exploring the application of this technology as a new media to replace traditional methods on burials and human remains from archaeological sites, and taking the application of the technology on the research Liangdao Man no.1 unearthed in Matsu as an example, discusses the issues including site excavation, burial recording, reconstruction of human skeleton, performance of replica simulation, ethics of museum exhibition and etc. from archaeological point of view to look at the advantages of the technology of producing new knowledge and its yet to be developed on this new field.

Keywords: Archaeology, Physical Anthropology, 3D Scanning, Reversed Engineering, Liangdao Man

一、前言

Archaeology is the study of the ancient and recent human past through material remains. It is a subfield of anthropology, the study of all human culture.... (Society for America Archaeology, home page 2013)

Archaeology is the scientific study of past cultures and the way people lived based on the things they left behind.... (Alabama Archaeology, home page 2013)

考古學是藉由古代人類的遺跡、遺物來復原重建古代社會文化與自然環境脈絡的一種科學。考古學發展至今，從技術層面而言，是一門在研究策略上必須採借其他領域方法（地質、生物遺傳、化學等）或稱跨學科整合性（interdisciplinary）的學科。考古學的「研究分析方法」與「記錄呈現手法」也因整合領域的發展而不斷變化。雖然各學派所關注的研究切入點不同，然而復原古代社會文化的終極理念卻都十分相近。

考古學獲取研究材料的最主要途徑之一便是進行考古發掘，正如一般大眾的理解，考古學家把古代的遺物、遺跡有系統的從地底下挖出來，然後抽絲剝繭推論出一段古代的故事，成為人類文明歷史的一個章節。然而，不論有多麼正當的理由，考古發掘本身就是一種破壞遺址及遺物的行為，一向為人所

詬病的缺點也在於發掘過程的「不可逆性」一如覆水難收。換言之，考古發掘結束後，絕對無法恢復遺址原貌；即使考古學家有責任，必須記錄下種種細節以提供脈絡的重建，但考古發掘的連續過程卻往往像一部被重度剪接的電影，時而依劇情所需而擇其精要剪輯，時而反覆重播、時而拉遠場景、時而放大觀察，亦或天馬行空的跳躍而任看倌自行想像。考古學者們也正是理解到這個缺憾，而無不盡力詳細記錄發掘所見，並以各種手法加以記錄與呈現，期盼可以更接近全面的、客觀的記錄下事實，即使如此，仍無法達到所謂完整記錄或跳脫主觀判斷的窠臼。因此，致力於發掘調查記錄之完整性與標準化，一直是第一線的考古學家們所關注的問題。另一方面，出土遺物本身的唯一性、不可破壞、不可汙染、展示倫理等問題，更是考古學家經常面對的問題，也因而有了修復與複製文物的需求。

二、3D掃描、逆向輸出技術與考古學

學者將3D列印（3D逆向工程）技術稱為「第三次工業革命」、「自造者時代」（連育德，2013）。美國創投教父 Paul Graham 也曾總結3D列印技術對現代生活的影響，他說：「我們正在經歷硬體時代的文藝復興，……這將引領下一系列的科學與藝術革命。」¹但是，也有臺灣面板教父郭台銘接受媒體專訪時，談到3D列印技術只是噱頭，他更直說「若真的造成第三次工業革命，我的郭字可以倒過來寫。」²事實上，在商言商

¹ 路怡珍，〈3D列印：硬體的文藝復興時代，臺灣能做什麼？專訪台灣貝特設計〉，資料來源：yowuReport有物報告網站，<http://yowureport.com/?p=8258>，2013年9月5日下載。

² 嚴珮華、鍾張涵（2013）〈郭台銘：3D列印只是噱頭〉，《聯合晚報》，2013年6月24日。

並無不妥，對於量產代工的企業而言，無法量產以獲致高報酬的技術有如此評價並非誤謬，事實上這也正凸顯了3D技術在現階段仍有侷限性。但是我們若從不同角度環視，3D掃描與逆向輸出技術對於文創、時尚、藝術、醫學、修復、實驗科學、天文科學等無須量產的領域，卻可以藉由這個技術的革命，顛覆傳統程序與觀察視野。

考古學是具高度整合性的學門，不論是理論上或是技術上，在這一波浪潮中自無法置身事外。事實上，許多過去所面臨的問題似乎在3D掃描與逆向輸出技術開發下有了新的契機，但是我們仍必須強調，考古學家運用3D掃描技術的目的，並非只是單純進行「影像記錄」或「複製」工作，而更必須利用其「非接觸性」、「高精確度」、「影像與向量結合」、「3D視野的實境重建」的特性，提供考古學家建立與保存更完整的考古脈絡，並發揮反覆檢驗的效果，一如科學方法的原則。如今，這個新技術與考古學的整合應用已日趨成熟，不久的未來必然成為主流的記錄方法（Remondino, 2011；Barsanti et al., 2013；Altantsetseg et al., 2013；Amans et al., 2013）。換言之，未來若能透過3D掃描，將所有考古遺址脈絡、出土文物測量數據、影像與發掘程序都詳細記錄，存檔於安全的資料庫，並在適當時機提供資料共享。如此，學者便可以通過重新觀察來檢視判斷結果，也就是達到資

訊的充分公開（full disclosure），與確認這些資訊的可信度（reliability），使考古學所建構的歷史與古代文化，跳脫出只靠權威詮釋下所建構的想像。

3D技術在考古學上的運用層面，從記錄、實境重建到文物複製等，幾乎肉眼視覺所及無所不包。臺灣在3D掃描的工業、電子業上的運用已十分普及與發達。但是，特別針對文化資產服務的私人企業在臺灣目前尚未出現，而國外已有許多專為文化資產保護與考古工作服務的3D相關公司，如數位考古學（Digital archaeology）³、英國的3D考古學會（3D archaeological society）⁴、日本3DNetworkJapan⁵等等。此外，文化資產保護研究機構與大學相關科系，也開始將3D掃描相關儀器列入採購的標準設備當中，這不只是形成一個巨大的產業商機，也將考古學與文化資產保護技術的標準帶向新的境界。

除了精彩的視覺效果外，讓我們回到考古學的原點，考古學利用3D掃描技術的目的是什麼？3D技術究竟可以達到哪些與過去不同的研究效果？合不合乎效益？能否取代人的經驗？甚至是產生新的研究盲點？筆者並非3D掃描或逆向工程技術的專家，只能說是站在應用端的立場，來看待這個技術的發展與在考古學上的可能應用層面。3D掃描除了加強彌補已被破壞之「實境場景」的記錄，還能為考古學研究上做些

³ 數位考古學網站：www.digital-archaeology.com，2014年8月1日下載。

⁴ 英國3D考古學會網站：www.3darchaeology.co.uk，2014年8月1日下載。

⁵ 日本3DNetworkJapan網站：www.3dnet-j.com，2014年8月1日下載。

什麼？逆向輸出工程除了輸出一個極為接近原始尺寸的物件，還能為考古學服務什麼？談到「文物複製」也就是與逆向輸出工程相關，我們不免要問考古學者對於文物複製的需求是建立在甚麼樣的背景之上？筆者認為考古學本身的研究對象是人（human）與其文化（culture），還有與相關遺址（site）、出土物（artifacts）、現象（features）等；研究材料上必須藉由原物原件的第一手資料才是根本。研究過程中，文物複製充其量只是做為研究過程中的副產品，例如文物修復、實驗考古之用，或是提供複製品給學校與博物館教育展示。而從博物館的角度來看，3D掃描與逆向工程的發展，對於博物館的蒐集、保存、研究、傳播、展示的幾個基本要求上，確實具有積極的加分作用。博物館甚至希望透過3D技術與網路雲端的無國界特性，將博物館物典藏物件直接送到你的雲端資料夾與你家的3D印表機上，3D科技可說是在列印過去、列印未來。更進一步而言，3D技術是在列印有科學研究背景的虛擬世界，也在創造藝術與全新的知識吸收方式。世界各國的著名博物館，無不積極開發項新技術的應用層面，如美國史密森尼博物館所設立的網站 Smithsonian X 3DBETA（2014 <http://3d.si.edu/>, Smithsonian Institute, Digitization Program Office）與大都會美術博物館（2014 <http://www.metmuseum.org>, The Metropolitan Museum of Art, Digital Media department）也有專業部門因應這個新趨勢。

另一方面，由於博物館的展示概念也非一成不變，除了基礎知識的堆築，

激發觀眾的多元思考亦是重要的一部分。就博物館展示的呈現方式而論，不應該只是呆板陳列學者們所建構的硬板板「知識」，也不希望變成充斥互動裝置的電子遊樂場，或充斥設計公司為譁眾取寵而製造的高度虛擬化玻璃纖維偶像，理念上更有必要呈現知識的「生產過程」，甚至是在博物館展示的過程中相應「生產知識」。因此，在強調考古學知識公眾化、普及化的時代中，考古學家所建構的歷史場景與古文明體系，也必須赤裸裸的面對大眾的檢驗與挑戰，3D掃描與逆向工程便成為可以運用的技術工具，不只是滿足文化觀光與娛樂需求，還能在更精確的互動過程中產生新的思維角度。

墓葬是考古發掘與研究中最受到重視與關注的材料之一，共伴出土的物件除了陪葬品、葬具，更有墓主的遺骸。是考古學重建古代社會文化的重要材料，其呈現層次豐富的古代社會文化樣貌，包含了人種來源、工藝技術、物質文化、階級分工到宗教觀、宇宙觀等表現。在博物館的展示中，墓葬也是最引人入勝的展示物件，除了是生者（參觀者）與死者（古代遺骸）的面對面對話，更充滿了禁忌的神祕想像，令人印象深刻難忘。考古學者如何讓墓葬自身述說出自己的故事？如何將並非永恆不朽的瞬間記錄下來？一直是考古學者精進追求的目標。

三、出土墓葬的記錄方式

考古遺址出土墓葬與人骨時，考古學家必須藉由各種手法具體記錄與呈現其出土脈絡。墓葬的內涵所包含的項目

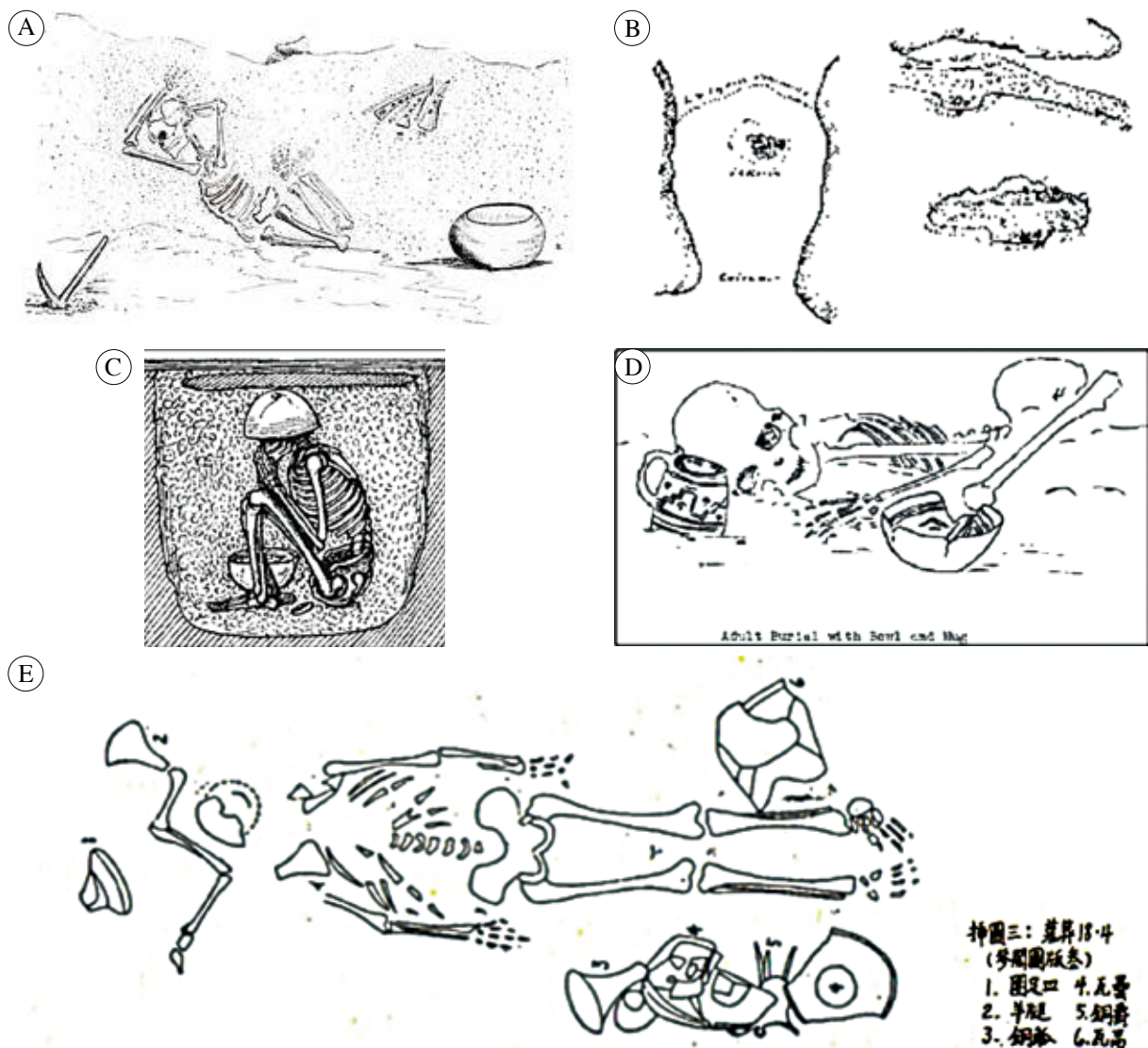
相當廣，如墓穴、葬具、陪葬品、人身裝飾等，基本上可以粗分為三個層次的記錄：第一個層面是出土脈絡的記錄，包括了出土層位、空間位置，還有以墓主為中心的相關器物與現象之共伴關係。第二個層面為人骨的in-situ出土狀態，包括葬姿、朝向與骨骼關節狀態。第三個層面為人骨的體質人類學觀察，

包含性別與死亡年齡的判定、形態特徵觀察測量、病理現象與後續的修復、顏面復原等。本文將著重於第二與第三兩個層面的探討。

(一) 人骨的出土狀態 (in-situ) 的記錄

1. 早期手繪素描

早期考古發掘由於照相設備並不普



▲圖1. 早期的墓葬繪圖。

Figure 1. Early styles of archaeological burial sketch.

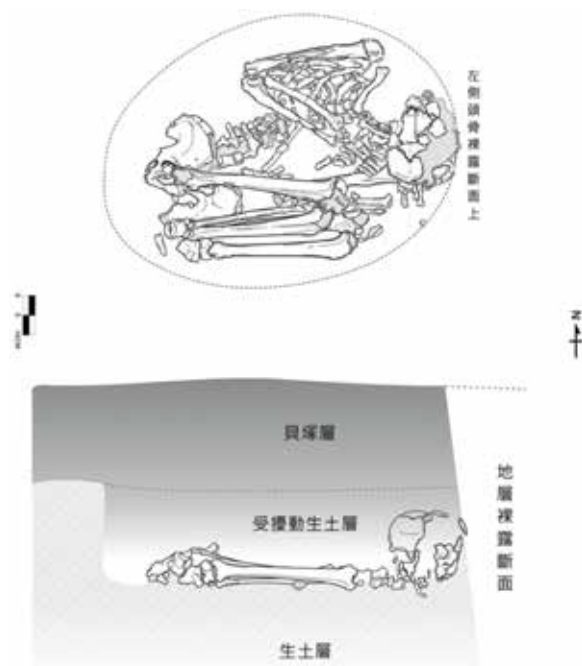
圖片來源：A：Charles Frederick Holder（1896）；B：Aleš Hrdlička（1914）；C：Walter J. Fewkes（1914）；D：Paul R. Franke（1933）；E：李濟（1931）

及，常見以鉛筆手繪的方式呈現出土墓葬的樣貌，但是早期的手繪素描圖多半在尺寸、比例、角度上不甚精確，甚至摻入了想像情景。圖1所示乃百年以上或近百年前，繪者對遺址出土墓葬人骨的素描繪圖，這幾張圖乍看之下似乎表達繪者在遺址所見的實際狀況，實則僅為示意圖。圖1A繪圖者的角度不明確，除了人骨、陪葬品之外，甚至還出現了挖掘工具；圖1B的例子中，雖清楚地表現出墓葬在洞穴中的相對位置與地層，對於人骨姿態的描繪記錄卻顯得不夠清晰。圖1C的繪圖，我們很難想像一具蹲坐屈肢的人骨架，在歷經埋葬與腐朽風化過程後，仍然能夠保持如圖面所繪的姿態，發掘技術上亦無法讓繪者在此一角度進行實際的測繪。圖1D應該也只是繪者站在約30度角的現場景象速寫圖，重點在於陪葬的器物。透過這些例子，我們知道過去的墓葬繪圖沒有一套標準做法，繪者所呈現的圖像往往並非透過準確的實測，有些場景甚至是虛擬復原的想像，繪者也常常強調陪葬器物更甚於人骨遺骸的狀態。

2. 實測繪圖（俯視+側視）+2D照相（從黑白到彩色）+動態影像錄製

自1950年代相機普及以來，不論是彩色或黑白，也不論是底片時代還是進入數位影像的時代，考古學界在墓葬與人骨的記錄方法上除了文字、繪圖與照相外，頂多就是加上動態的影像錄製。雖然墓葬中的人骨已經無法呈現「動態」，但動態攝影可以輔助照片無法多角度呈現的缺點，然而僅能做為視覺上的記錄觀察之用，難以運用於研究。不論是哪種方法，最終的目的都是為了盡

力記錄下每段出土的環節與脈絡關係。早期考古發掘報告中，以手繪原稿的直接描繪直接刊載（圖1E），比較不強調骨骼細部的精確測繪、出土層位，而更為強調墓葬中陪葬品與墓主的位置，對於人骨的姿勢與轉向並不明確說明或細繪。近年來，手繪圖的操作方法不論在繪圖比例、視角、點與線的表現方式上則更加精確與系統化，並在電腦軟體中結合了其他層位上的測量記錄，目的乃在將墓葬人骨的實際狀況與出土層位脈絡關係做更加清晰的交代（圖2）。



▲圖2. 亮島人1號人骨出土樣態俯視及側視線繪圖。

Figure 2. The overlooking and side-looking sketch of Liangdao Man No. 1.

圖片來源：詹凱雁繪製

3. 3D掃描（從影像到向量）

從攝影照相對3D掃描的轉變，亦是將記錄對象的資料格式從影像（image）

到向量資料 (vector data) 的轉變，大大提高了解析度與運用層面。其技術的開發運用與成熟發展大約是自1980年代以後至今，特別是近十餘年來的發展，3D 掃描資料從單純只能在電腦處理，導向實體輸出 (或稱3D輸出或列印)，在考古學上的運用案例更是屢見不鮮。早期將此技術運用在墓葬人骨上，較著名的有日本在1995年便嘗試以「非接觸三次元形狀計測法」與「光造形複製」，研究出土於敘利亞Dederiyeh洞穴的尼安德塔人幼童，利用3D掃描與逆向工程技術進行人骨複製與一連串的相關研究，包括：精密體質測量、顏面復原、運動型態 (步行復原)、成長復原、電腦虛擬動態、立體影像等 (東京大學總合資料館編集，1995)。這個研究案例結合了考古學、體質人類學、藝術、醫學解剖學、運動物理學、影像科技、光電科學，研究成果不只是侷限於3D掃描與複製而已。相關資料與影像由日本著名學

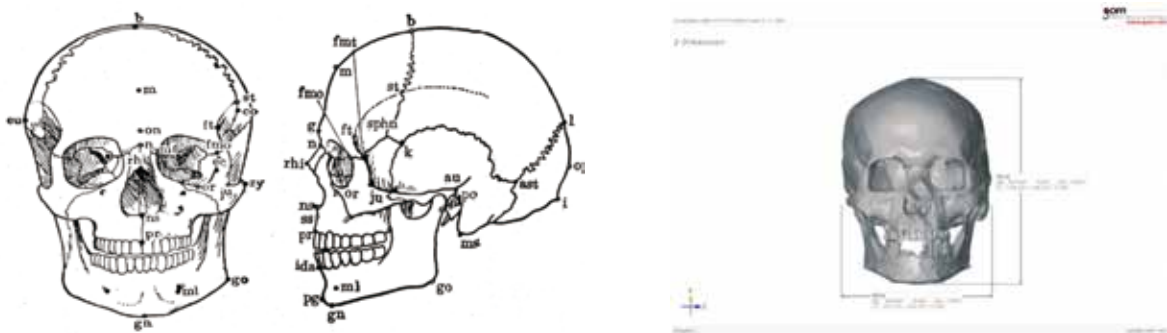
者赤澤威 (Akazawa Takeru) 公開於網站上，成爲一個90年代著名的研究案例⁶。

3D掃描可記錄的資訊量大增，客觀而言雖然3D技術無論如何精細也沒有辦法達到100%的境界。但是就目前的研究需求而言，毫無疑問的大大提升了記錄的資訊量；對考古學而言，如何更有效利用這項技術，使其如現在的數位相機一般，達到人人皆會用、人人用得起、相關儲存編輯介面操作更加簡便，進一步成爲考古工作上的標準工作配備，是一項可以期待的目標。

(二) 體質人類學知識的建立

1. 精確定點測量

傳統體質人類學的形態學 (Morphology) 研究有賴於標準化的定點測量 (圖3左)，體質測量方法以手持測量工具如彎腳規、游標卡尺、下顎計、角度計、坐標滑動計等特殊設計的尺規進行測量。目前不僅這些



▲圖3. 傳統頭骨形態學測量點位與代號 (左)，以3D掃描檔案於電腦軟體中進行測量 (右：亮島人1號)。

Figure 3. The standard metric points of traditional skull morphology (left). Measuring the skull by 3D scanning file in computer software (right: Liangdao Man No.1).

圖片來源：邱鴻霖提供

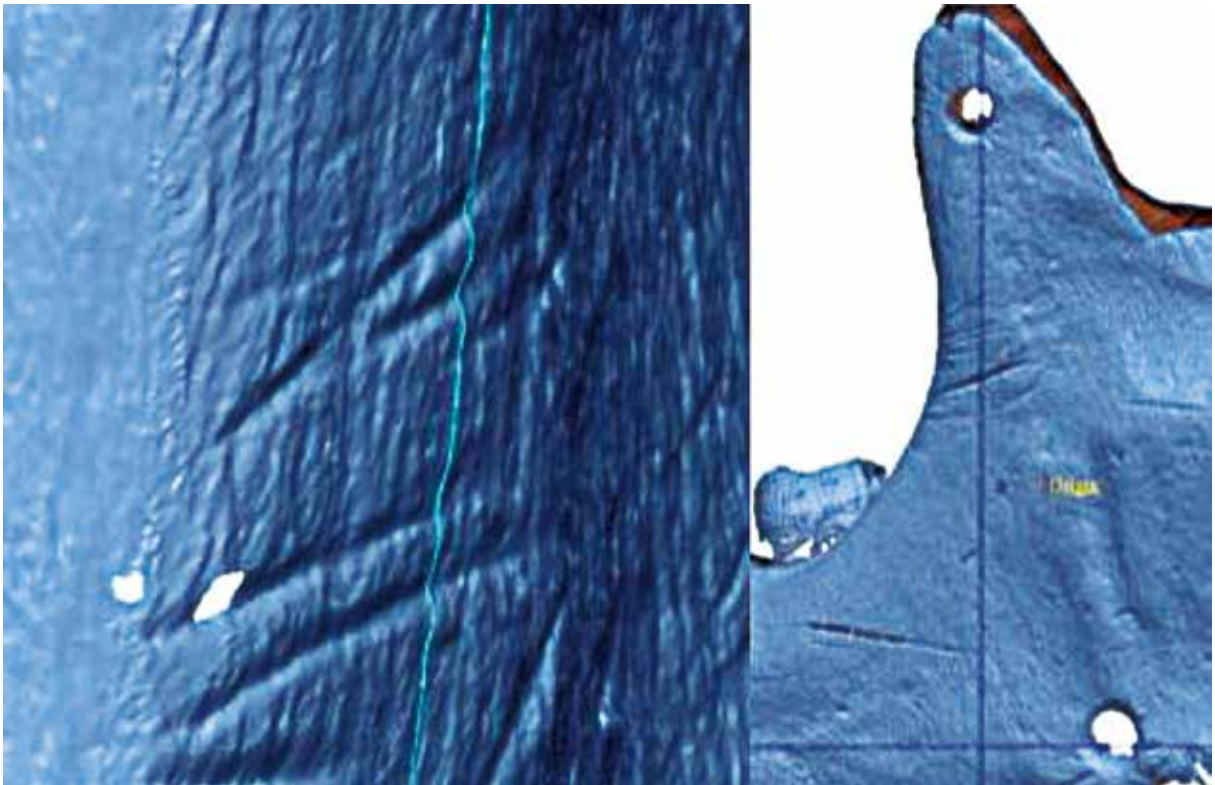
⁶ 赤澤威，資料來源：デデリエ ネアンデルタール網站<http://www.kochi-tech.ac.jp/akazawa/index.html>，2014年11月05日下載。

設備取得不易且昂貴，使用時測量點往往會因不夠準確居中，或是沒有辦法以肉眼目視的方式抓到準確最長、最寬、最窄的位置，而產生些許人為操作上的偏差。此外，手持頭骨進行測量時，亦經常發生意外的碰撞破損與造成生物汙染。而3D掃描檔案可以輕易在軟體上進行精確的測量，克服這些問題（圖3右）。

2. 微痕觀察的侷限性

現今3D掃描的解析能力能夠提供何種程度的體質人類學觀察？依目前最高精度的3D掃描器，其構成向量圖的點間距離為0.017 mm，產生的數據資料量大，需要高效能的電腦進行處理，也需

要穩定度較高的掃描環境，以避免微小震動。因此，一般掃描時所使用的解析程度通常不會那麼高，須視研究需求調整解析度。如圖4之掃描點距為0.025 mm，肉眼觀察下顎枝表面之砍切痕剖面應該呈現深V形的銳角，然而3D掃描所呈現的骨骼表面的砍切痕微痕剖面，卻因掃描測量的解析度的限制，呈現了較圓鈍的曲線，仍無法具體因應研究上的要求。但是，針對人骨定點測量、骨骼剖面形態、病理現象、砍切痕跡之表面分布狀況，相較於傳統的記錄方式（拍照、繪圖）則能更加清楚、更精確、更全面性的呈現。因此，依研究所需，技術上有時仍必須搭配其他更高精密度的儀器，如立體顯微鏡等，方能克服解析度上的需求。



▲圖4. 3D掃描人骨表面砍切痕細部觀察。

Figure 4. The observation of cut-mark details of human bone by 3D scanning data.

圖片來源：邱鴻霖提供

四、研究上應用層面優點

逆向工程 (Reverse Engineering) 是當一個實物或是手工模型經由量測 (3D 掃瞄) → 向量資料建立 → 實際輸出的流程。目前這套技術普遍運用於高精度工業原件與醫療用品的製作上。RP (Rapid prototyping) 所指的是快速成形輸出。依不同開發廠商之產品設計而有各種材質。3D 掃瞄與 RP 複製技術在人骨的應用上已相當廣泛，包括：「醫療與教育用骨骼複製」、「顏面虛擬重建」，綜觀這些案例可以歸納出幾個相較於傳統方法的優點，包括：

1. 低接觸性

3D 掃瞄可減低實驗汙染與受外力破壞，取代目前最常被應用的矽膠翻模。學者何傳坤〈淇武蘭遺址出土墓葬現象與考古遺物翻製修復記〉一文中，亦指出墓葬翻模複製難度高，乃因墓葬的複雜性與人骨的保存狀況，因此翻模前必須進行強化與藥劑深層滲透 (何傳坤等, 2005)。近年來，臺灣考古的搶救發掘現場出土大量墓葬與人骨，爲了保有人骨出土時的完整性與原始姿態，另一方面也爲了因應搶救發掘在時間、天候、經費、人才短缺的多重壓力，採取了以矽膠做爲內模、以玻璃纖維覆塗不飽和聚脂做爲外模的包覆方法，將整座墓葬與人骨從考古發掘現場搬移入室內清理記錄，人骨之兩面土壤皆清除完成後，骨骼即固定於矽膠上。此舉雖然暫時解決了田野發掘時的問題，然而卻可能導致後續研究上的生化汙染，使得人骨 DNA 的完整性與萃取成功率皆相當低。另一方面，人骨無法拆解 (disarticulate) 的狀況下，對於體質人類

學研究也難以針對各別骨骼進行準確的測量與觀察。

依筆者的觀察，傳統翻模技術的應用過程中必須用到大量化學原料，包括丙酮、B72、乙酸異戊酯 (香蕉水)、硬化劑、矽膠、肥皂水隔離劑、玻璃纖維、樹脂、潤滑劑等，如遇保存狀況較差的人骨，更需使用化學藥劑強化人骨結構，以避免剝模過程位移損壞。翻製過程中侵入性的化學汙染，幾乎成爲傳統複製技術流程中的必要之惡。後續甚至衍生出矽膠劣化，與無法隔絕矽膠內模與玻璃纖維樹脂外模間包藏水氣與黴菌的問題。3D 掃瞄與 RP 逆向輸出技術，可以確保人骨不受到接觸性的化學汙染及物理性破壞，並達到複製與保有出土時狀態之目的，也有利於後續的典藏工作。

2. 不同考古發掘階段的精確記錄 (出土脈絡的保存)

由上而下層層下挖、層層記錄是考古發掘最基本的記錄策略，目前已經有許多利用 3D 技術記錄考古遺址發掘成果與討論，例如由德國維也納大學考古科學研究中心 (Vienna Institute for Archaeological Science) 自 2004 年所展開的埃及金字塔 3D 掃瞄計畫 (The Scanning of the Pyramids Project, Neubauer and Studnicka, 2004)，西班牙著名史前洞穴壁畫遺址群的 3D + 2D 技術結合 (Domingo *et al.*, 2013)，中國在 2014 年展開的「數字長城保護工程 (The Great Wall of China in 3D)」，以上案例之成果受到考古學界與文化資產保護學界高度關注，世界各地相類似的案例不勝枚

舉；研究的應用上也有出土尼安德塔人下顎骨運用3D掃描技術的研究的案例（Harvati et al., 2011）。

近年來學者對3D技術應用上的優缺點亦多有評述，缺點大多著眼於更新、更高解析度儀器的出現與檔案格式的改變，筆者於本文不加贅言。不論如何，墓葬與出土人骨在考古遺址現場的記錄，若能以3D掃描技術做為最前線的記錄器材，則勢必能保留更多出土脈絡的訊息。3D技術日新月異，我們不能坐以觀望，雖然現階段仍無法達到完全掃描透視地表下狀況的功能，但輔以考古現場發掘者的經驗判斷，亦能精準留下有意義的記錄。

3. 人骨關節狀態

3D掃描檔案在電腦中能夠克服視覺角度的障礙，藉由軟體上的X、Y、Z三軸旋轉與縮放功能，能清楚呈現各部位骨骼在解剖學上的立體關聯。運用在醫學上已經有相當成果，包括外科骨骼重建手術與復健醫學上。在人骨的應用上，可呈現人骨各部位出土位置與關節狀態的合理性推斷，進一步提供準確的推論基礎。對於出土人骨在拆解前的關節狀態，可留下比人工繪圖更加精確與多面向的資料。

4. 空間分析

結合了全球定位系統，使出土墓葬進行3D掃描之同時，亦建立坐標資料及納入GIS的圖層之中，研究上可即時提供整體人骨出土空間上的立體觀察、比對與屬性關聯分析，也可以提高記錄時間上的效率與提供模擬實境重建的基礎資料。

五、教育展示與修護典藏的應用

(一) 展示

透過3D掃描逆向輸出高精準度的複製文物，除了更有利於展示教育，也使文物「原件」受到更妥當的典藏保護。透過其他遺址環境、空間資訊的結合，也能更精確掌握遺址之現場重建。

1. 3D影像展示

透過3D掃描檔案的呈現與設計，在視覺上的親近性、多角度觀察與互動操作等手法，的確使得觀眾可以透過多媒體，以非直接接觸樣本的方式，多角度、多種方式進行細部觀察或動作模擬。引導觀眾了解體質人類學家如何透過人骨特徵的觀察與測量，建立起死者的個人的生命履歷。更可以結合考古學所重建的古代環境、聚落形態等資訊，依個體的特徵（性別、年齡、健康狀況、專業分工下的慣性傷害）置入這些復原的情境之中，提供了更豐富的知識性，也更能強化觀眾的印象。

2. 輸出仿真複製品

一方面因應展示教育所需，另一方提供顏面復原研究工作精準的基礎骨架，3D+RP逆向輸出大大提高顏面復原在體質上的重現度。國內首次嘗試以3D+RP逆向輸出的研究為「南科史前文化住民顏面復原研究計畫」（臧振華、李匡梯、邱鴻霖、李志文，2011）。但是，即使有了新科技的輔助，卻仍需考古學知識的輔助。例如體質與顏面形態的重建，難以精確掌握到許多細部顏面特徵的表現，例如髮型、眉型、胖瘦、膚色、皺紋、毀飾（紋面）、人身裝飾等表現，通常只能優先採取最折衷、不

極端的表現方式，但卻往往僵硬而不夠生動逼真（圖5）。事實上，如果希望賦予復原樣貌兼具生動與精確度的表現，除了體質人類學研究與法醫人類學研究，可以提供個體生前的人種、性別、死亡年齡、眼耳鼻唇形、疾病表現等條件，以建立起個體的基礎樣貌，更必須透過考古學研究提供當時古人的物質文化、人身裝飾、圖騰與藝術表現（例如壁畫中的人物、陶偶等）來輔助顏面復原的修飾，賦予復原顏面的「文化特徵」；更進一步對考古遺址的自然背景與出土脈絡，抽絲剝繭尋找與「史前

人」在生態適應上密切相關的特徵與線索，藉此賦予重建顏面在體質型態以外的「生存環境背景」與「適應特徵」。此外，亦可透過民族學上類比、情境的想像，來豐富顏面復原的內容。更細緻的表現如表情、鬚鬚、情緒、眼神，則屬於法醫藝術（Forensic Art）的表現，可以依考古學研究所提供的展示背景情境而見仁見智的加以調整。例如在強風、強光的海濱，一般人的眼部會呈現眯眼皺眉的狀態，在漁獵捕獸之當下則張大眼專注緊盯獵物等情況。



▲圖5. 骨骼—肌理—皮膚—表情—髮型等復原表現。

Figure 5. The performance of facial reconstruction, from bone, muscle, skin, hair style to facial expression.

圖片來源：臧振華、李匡悌、邱鴻霖、李志文（2011）《南科史前文化住民面部復原研究計畫結案報告》，國立臺灣史前文化博物館委託執行，臺東：國立臺灣史前文化博物館，詹凱雁改繪

3. 展示與研究倫理 (Exhibitions and Research Ethics)

1980年代以來，博物館的人體遺骸的展示所涉及的倫理問題，受到學者們的廣泛討論；1990年美國甚至明確訂出與原住民墓葬相關之保護規定 Native American Graves Protection and Repatriation Act (簡稱NAGPRA)。這個法案的建立，是基於博物館過去所蒐集與美國原住民可能有直接關聯的墓葬遺物，導致許多原住民祖先墓葬遭到破壞，博物館的展示活動甚至使其族群感到祖先的遺骨遭到侵犯與褻瀆，令當代後裔不忍卒睹。該法案的基本精神包括，維護這些墓葬必須受到法律的保護，有不受侵擾的基本權利，並尊重其族群在宗教信仰上的處置方式，也必須關注到當代後裔的優先處置權力與文化上的解釋權。即使是目前仍無法明確與當代任一美洲原住民族群構聯關係的「史前人」，如在美國發現數萬年前的 Kennewick Man，其典藏所有權、研究分析權、後續處置方式都受到以NAGPRA為基礎的評論與關注。今日，博物館或大學研究機構即使是只蒐藏教育用標本，而不展示人體組織、骨骼相關標本，還是要相當程度注意人體組織在研究倫理的批判與要求，以尊重人權倫理，避免陷入種族歧視與歷史事件的紛爭之中。更有學者認為即使是展示「影像」，也必須注重倫理相關問題。因此，3D掃描與逆向輸出同樣也必須面對這些課題，如何有條件的進行人骨或人

體組織相關的複製、展示與研究，恐怕是臺灣今後必須進一步思考的問題。

從馬祖亮島人現階段的研究成果，學者指出從「生物遺傳學」與「體質形態學」認識到其與當代臺灣南島語族的高度關聯性（陳仲玉、邱鴻霖、游桂香、林芳儀、尹意智，2012）⁷。雖然目前臺灣對人類遺骸展示的倫理意識，尚未高漲至如西方先進國家一般，但相信在亮島人的研究更加深入時，亮島人與當代臺灣南島族群或其他地區的人種族群的關聯性，必定會更加受到矚目，屆時會誘發什麼樣的問題？筆者在此無法妄言猜測。目前人骨收存於馬祖民俗文物館中，館中所展示的頭骨是以3D仿真複製品取代真品，展示效果並未打折扣，也常被觀眾誤以為真。未來移地巡展時，仿真品亦可於異地同時展出，除了無需原件承擔運輸風險，或許也可以在某種程度上迴避人骨真品的展示倫理問題。

(二) 修護典藏

3D掃描利用於文物典藏與修護上已有許多具體的研究案例，主要利用其非破壞性檢測與穩定精準測量的優勢，運用於兩個層面：1. 輔助修護，包括缺件補遺與結構加強；2. 修復文物之微變化監測。在輔助人骨的修護工作中，能夠藉由3D掃描檔案針對缺陷部位輸出以精確填補，減少了不必要的黏著與填充修整；此外也可以透過檔案，針對骨骼因

⁷ 「語族」的概念與生物遺傳或體質形態的概念並不相同，長時間的人群移動與文化變遷等諸多因素，使亮島人與當代臺灣南島語族關係之構聯，存在著很大的討論空間，其年代上亦早於語言學家推估南島語族的形成。因此，亮島人是否有「南島」的特質？是否操著相同的語系？還是只有身體上具有相較於亞洲其他族群更高的親緣性？他是否就是臺灣南島族群的祖先，則須更深入的探討與研究。

埋藏環境的影響而導致變形的部位，進行合理的數位修正復原。

另一方面，學者也指出文化資產的保存、監測與管理最重要的工作，是了解損壞現象是否發生或是持續作用，但純以目視或其他顯微儀器進行檢測，而沒有配合客觀的參考指標，常造成主觀上的判斷錯誤。所以對於文化資產的檢測，需要依靠客觀的儀器檢測數據，進行損壞狀況的檢視紀錄，方能提供保存工作者有效的損壞資訊（邵慶旺、張舜孔，2010）。對於日益頻繁的博物館際文物交流換展活動，文物在返還原館時是否發生物理或化學變化而導致形變，3D掃描可以提供更客觀的檢驗基礎以減少爭議發生。

（三）觀眾角度

1. 減低觀眾對人骨的恐懼感

墓葬與人骨是死亡的象徵，人類對死亡的禁忌向來是有增無減，對死後世界的想像往往恐懼多於美好，許多族群甚至採取極端忌避的態度，視墳地與墓葬為另類空間，視人骨為不祥或不潔之物。而博物館中為了促進知識傳達，該如何有技巧地減低觀眾「不愉快」的感受，卻又有「真實」的感動與知識吸收？筆者認為，除了以影像展視於銀幕之外，高度精細的仿真複製品在適當的展示規劃之下亦能提供一條解決途徑。

2. 多角度近距離觀察與可接觸性

多媒體的呈現方式的確是博物館的展示趨勢，3D掃描「向量」數值資料相較於以往的「影像」資料，更具應用上的靈活度與精確度，是多媒體展示的最

佳基礎資料。另一方面，近年來博物館文物的展示方式亦考量了「觀眾與展示文物」之間的視覺關係，不再隔著玻璃櫥窗或警示圍籬。根據文物的稀有性與保存狀況，許多博物館也提供一般民眾有親手觸摸與零距離觀察真品文物的機會，例如：東京都埋藏文化財中心（圖6）、大阪府立近飛鳥博物館設置了專區，提供部分文物讓參觀民眾可以親手拿著文物進行觀察、拍照；除了誘發觀眾更多的學習興趣，更使得古今交會的體驗感受不再只是考古學家的專利，展現出文化資產的內涵具有大眾公共資產的意義。然而，這僅侷限於一般出土數量較多的人工製品，真實的人骨恐怕難以在此體驗區之列。所以，針對稀有文物或是有倫理爭議的人骨，博物館以3D資料為基礎，提供具真實感的高精度影像或複製品提供觀眾實際觸碰，或許也是未來可以嘗試的展示手法。



▲圖6. 距今約五、六千年前的繩文時代陶器，提供真品觸摸體驗。

Figure 6. The potteries of Japan Jōmon period from about 5,000-6,000 B.P., it provides the accessibility of touching real archaeological artifacts for public.

圖片來源：東京都埋藏文化財中心

3. 像不像有關係！

許多考古遺址出土的遺留如人骨、高度腐朽的金屬物件與脆弱的有機遺留，常因展示倫理與保存條件較為嚴苛而不允許真品展示，必須藉由分身（複製品）來代勞，複製品與真品間的相似程度，也攸關著觀眾的觀感與正確的視覺知識吸收，這個時候我們必須說：像不像真的有關係！影像再怎麼鮮明與多角度，也比不上親眼所見與親手觸及的臨場感受，3D逆向工程的複製品做到了外形上高度近似，但是在複製物件的材質質感、顏色上仍需要以人工藝術表現加以克服，以創造仿如見到真品與親歷其境的感受。展示櫥窗中說明牌上的複製品（replica）標示，往往是令觀眾不願再細看一眼的主要原因，能讓人一眼看穿的道具與真假難辨的仿真複製品，對於觀眾的感受與知識的吸收還是有相當大的差距。筆者建議，建立起複製品的身分認證於展示牌上，提供觀眾做參考或許亦是可行之道。例如：3D+RP複製品、矽膠翻模複製品、虛擬復原複製品、圖像模擬製複製品等，讓觀眾了解眼前展示中的物件與原件的差異程度。就墓葬與人骨的展示而言，即使陳列的是3D複製品，仍能呈現展示物件的科學性與正確性，而不再是透過燈光效果與教學標準模型，來創造恐怖陰森的墓地與死亡感受。

六、馬祖出土亮島人為例

（一）亮島人1號墓葬出土狀況3D掃描 1. 「半脫脈絡」的現場3D掃描

亮島人1號於遺址出土第一時間，因考慮現地條件嚴峻，不論是天候、器材運補、電力供應等皆有相當大的難度，



▲圖7. 亮島人1號於遺址現場原始出土樣貌（俯視照）。

Figure 7. The in-situ appearance of Liangdao Man no.1 at the site(overlook).

圖片來源：文化部文化資產局提供

所以採取包覆土方運回室內（南竿馬祖民俗文物館庫房內），隨後再進行細部清整的策略。雖然人骨是保持原樣包覆於截切下來的土方之中，然而對於3D掃描工作的時機而言，等於喪失了得以將地層、地形、地景等相關脈絡一起掃描下來的機會。因此，筆者稱之為「半脫脈絡」的現場3D掃描，雖僅能夠將清整後裸露於土面上人骨的形態、葬姿精確掃描下來，卻也使後續的修復整理與展示工作得以順利進行。另一方面，這個半脫脈絡的狀態卻也提供了亮島人在清整與進行3D掃描時，有更理想的防護生化汙染之環境（圖8、圖9）。

事實上，民國100年（2011）底當亮島人1號甫出土之時，研究團隊尚未得知該墓葬的年代竟如此古老（約8,300B.P.），且島上發掘條件嚴峻，若無充分準備並不適合於現地清整墓葬提取人骨，因此決定截切包覆運回，並與專業團隊進行合作與後續工作。隨後，由筆者接手於馬祖民俗文物館庫房內清整亮島人1

號之時，筆者意識到這具人骨在考古學研究上的重要性，必須藉由3D掃描留下更完整的記錄，並將人骨加以修復。然而，筆者並非3D掃描相關技術之專家，因此建議向文化部請求專業支援，立即得到文化部文化資產局文化資產保存研究中心的技術支援（當時屬文建會「文化資產總管理處籌備處」），將半脫脈絡的in-situ狀態完成掃描。

後續在文化部專家會議上，學者建議以人骨直接進行Ams14C定年，以直接確認亮島人所屬年代，數據相繼出爐後更加確認了這具人骨的確切年代。人骨保存狀況，若以八千餘年前的人骨而言實為罕見。後續的修復與相關研究，也

正是因為人骨已進行了3D的掃描檔案，筆者才得以無後顧之憂的將人骨從土壤中提取出土。



▲圖8. 於馬祖民俗文物館的室內人骨清理工作。

Figure 8. The Indoor cleaning work at Matsu Folklore Culture Museum.

圖片來源：文化部文化資產局提供



▲圖9. 文化部文資局專家小組（邵慶旺、張舜孔等）全身防護進行人骨3D掃描。

Figure 9. The 3D experts (Shao Ching-wang, Chang Shun-kung, etc.) of the Bureau of Cultural Heritage, Ministry of Culture, wearing full protective clothing when scanning.

圖片來源：文化部文化資產局提供



▲圖10. 亮島人1號人骨移至室內清整後樣貌（左：斜側視，右：俯視）。

Figure 10. Finishing preliminary cleaning of the skeleton (left: Oblique side look, right: over look).

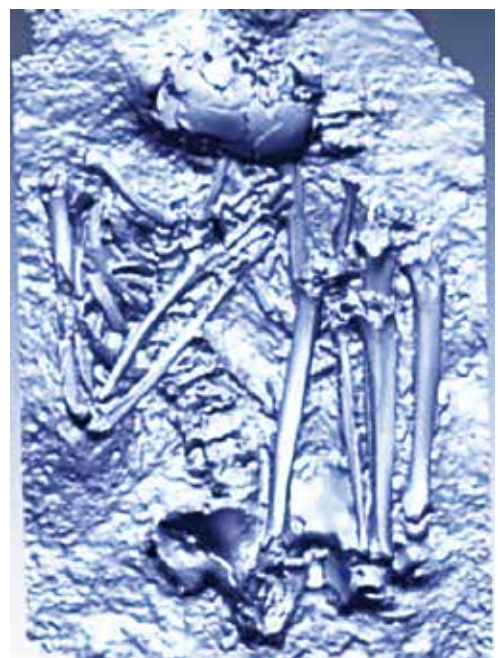
圖片來源：文化部文化資產局提供



▲圖11. 亮島人1號 3D數位模型圖。

Figure 11. 3D image model of Liangdao Man no. 1.

圖片來源：文化部文化資產局提供



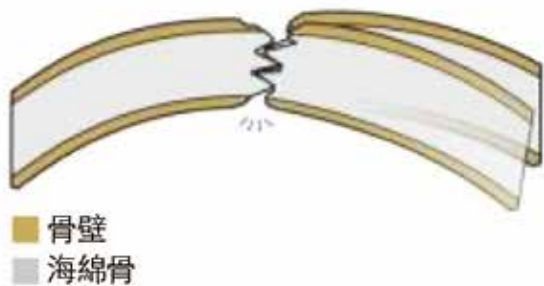
（二）亮島人 1 號的頭骨修復、3D 掃描與 RP 製作

1. 亮島人的頭骨修復

精確的頭骨修復是後續體質人類學研究、3D掃描與逆向輸出複製的基本條

件。若希望復原的頭骨能提供研究上堪用的測量數據，黏合的過程必須盡量避免虛擬模糊的空間。亮島人頭骨的保存狀況並不理想，1號人骨受到軍事用地建設開發而擾動，左側頭骨與顏面殘損嚴

重，但由於骨骼埋於貝塚之下，評估骨骼本身的保存狀況尚可（硬度、風化程度、骨片變形程度皆不高），殘缺部位亦仍有對稱部位殘留，應仍可復原頭骨而得到體質人類學研究所需測量數據，因此遂展開修復頭骨方法上的評估。理想上將所有頭骨破片皆進行3D掃描後，再於電腦上進行拼合是一個理想的策略，既可以減低對人骨的接觸汙染與破壞，無須利用化學黏著劑拼合，更可以留下每一個骨片在黏合前骨斷面的樣貌，遺缺部分亦可透過電腦進行對稱性的拼補。然而，經過對人骨出土原始狀態的掃描（In situ 3D scan）後，提取出的頭骨破片高達百餘件，大小破碎程度不一，頭蓋骨片的斷口狀態不一，有的斷口邊緣銳利新鮮，相當容易找到正確的角度黏合。然而，許多時候骨骼破片可能因風化作用、成岩作用以及潮濕環境而致使斷口圓鈍，無法找到精確的對應接點與原始角度(圖12)，更多是太過細小而難以利用其形狀找到正確拼合位



▲圖12. 骨骼斷口僅局部吻合，接合角度需經驗判斷。

Figure 12. The edge of broken bone pieces are only partially able to be reunion, it required experience to distinguish the bonding angle.

圖片來源：邱鴻霖提供

置，而必須藉骨骼表面的顏色、厚度、神經血管窩、孔、溝的走向來判斷相關位置，特別是年代久遠的骨骸。此外，將人骨從土壤中剔取出來的當下也經常發生新的斷面，必須立即黏合，才能確保黏合角度的正確性。

而透過「人工拼合」尚須克服以上問題，若在電腦中試圖找到正確的角度與接合點則難度亦高。因此，評估透過先掃描進行重建？或是先進行黏合重建再掃描？是一個棘手的問題。先前提到的日本案例中Dederiyeh尼安德塔人頭骨的情形，則是先採取人工修復後再進入3D掃描與逆向複製，筆者根據復原後的狀態推估，可精確接合的斷片數量所占比例應該較高。因此，亮島人的頭骨修復重建亦採取了相同策略。綜合筆者的人骨修復經驗，對於未來頭骨修復工程的評估，提出以下建議做為參考：

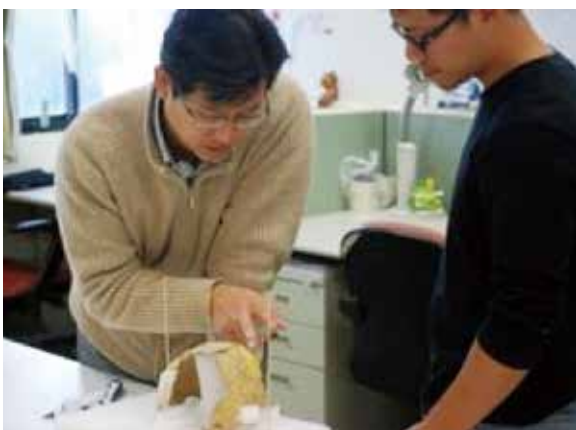
- (1) 不論骨骼變形程度如何，人骨出土時的in situ狀態皆於拆解修復前進行3D掃描，並標示出未變形部位，以供後續復原時參考。
- (2) 不論變形程度如何，骨骼於清潔後，至少應將面積較大的骨骼進行黏合前的3D掃描。
- (3) 骨骼變形程度「低」，且大多數骨片斷口仍保有較多辨識度高的斷面者，以採取人工重建後再進行掃描，可得到較為正確的頭骨形狀。
- (4) 骨骼變形程度「高」且殘存部位較少時，建議先清潔骨骼後再進行3D掃描，而後一片一片於電腦軟體上接合、修整弧度與對稱性，藉以獲致更高的修復完整度與合理的骨骼型態。



▲圖13. 亮島人1號頭骨出土狀態破碎，必須修復重建。

Figure 13. The skull of Liangdao Man no.1 is heavily broken when unearthed, repair and reconstruction is necessary.

圖片來源：邱鴻霖提供



▲圖14. 檢討人工修復時黏合角度的合理性與對稱性。

Figure 14. Checking the rationality and symmetry of bonding angle during manual repair.

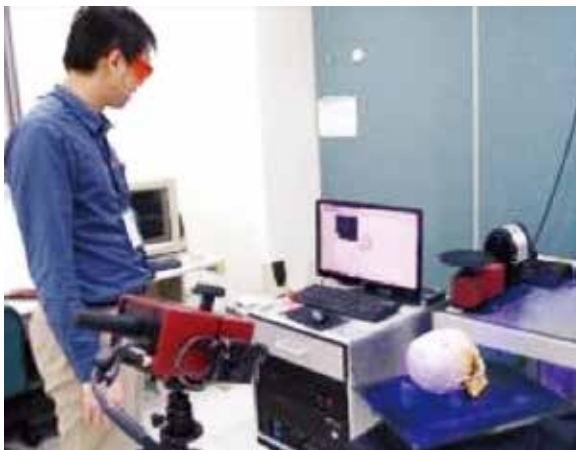
圖片來源：邱鴻霖提供

2. 3D掃描相關

(1) 3D掃描

頭骨模型複製採3D掃描與RP輸出的主要目的，在於克服傳統模型翻製樣本的方法中，模具製材與隔離劑必須直接接觸樣本表面，藉以取得樣本形態與剝離外模，這個動作對於重要考古遺物可能產生重大破壞與生化污染的缺點；而3D掃描與RP輸出製作原型模型的過程中，幾乎可以不接觸樣本，過程中僅有少量小面積低黏性之反射定位標貼需沾附於樣本表面，以提高掃描效率、增加掃描面積與精確程度，對於樣本的影響程度極低。

另一方面，現今掃瞄與輸出技術已趨成熟，其解析度已可達到極小的誤差。RP輸出之模型除了可用於展示之外，更可以提供後續亮島人「顏面復原」研究時所需的模型骨架。亮島人的修復頭骨掃瞄與RP輸出工作，委託臺灣馬路科技顧問有限公司以ATOS Compact Scan進行藍光光柵3D掃瞄，CCD像素2,500萬、點距0.017 - 0.481 mm（圖15），於臺南分公司進行掃瞄，掃瞄過程先將顱部與下顎骨咬合進行定位，後續則將顱部與下顎骨各別分開掃瞄成圖檔。



▲圖15. 3D掃瞄儀器（上）與亮島人1號頭骨掃瞄（下）。

Figure 15. The 3D scanning machine (top) and scanning the skull of Liangdao Man no.1 (bottom).

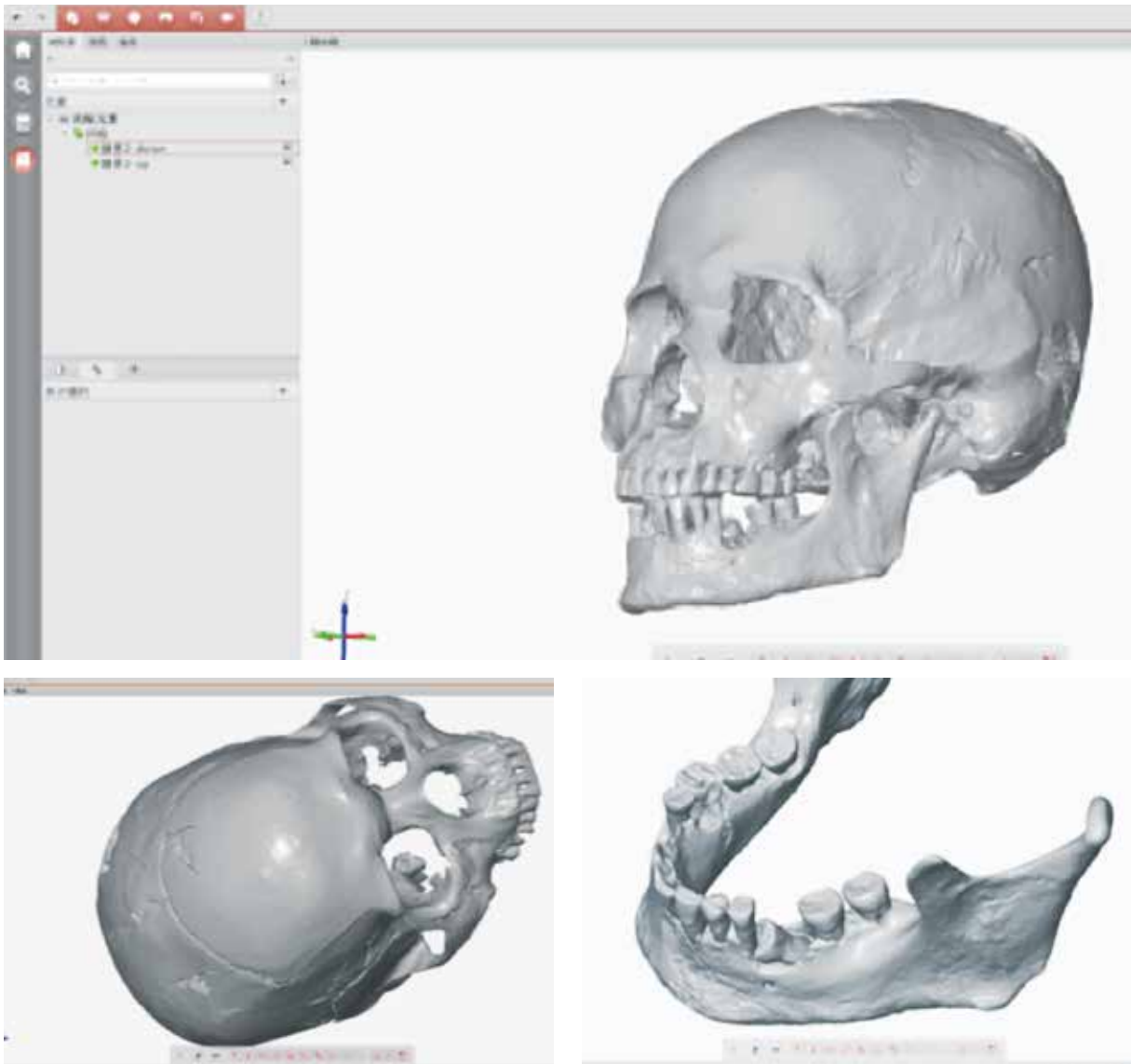
圖片來源：邱鴻霖提供

（2）3D檔案修補與瀏覽

3D掃瞄是透過光線針對物件表面進行掃瞄，往往直射的掃瞄光線無法進入的死角是一大盲點，特別是頭骨的構造複雜，有許多孔隙與角度，因此需要對檔案進行修補，這個部分可說是整個方法上精確度最低的部分。3D掃瞄數據於本案中以Sensable Freeform Modeling軟體進行修圖繪製與微調（fine tune），滿足後續RP輸出時線條間的封閉性與設定輸出厚度，這個步驟需要熟悉頭骨結構的專家協助進行，以防止修補設定出不合理的封閉區塊。最後製成格式為STL之檔案，可自網路上自由下載之免費軟體GOM Inspect進行瀏覽編輯及各部位測量。除了在研究上可以達到頭骨各部位精確測量尺寸與角度，在展示效果上也可利用軟體製作頭骨360度旋轉觀察之影片，使閱聽者可以從更多的角度觀察亮島人頭骨各部位細緻特徵的視覺效果（圖16）。

3. 亮島人的逆向工程與RP（Rapid prototyping）輸出

在亮島人頭骨複製的過程中，採用UV Curable Acrylic Plastic（紫外線固化丙烯酸塑料，或稱光硬化樹脂），就實際輸出上的表現，其優點在於相較於其他材質如ABS或矽酸鈣粉，更能夠精緻呈現掃瞄物件的細緻紋路，缺點為材質本身的硬度脆性較高不耐摔碰，本研究計畫中透過增加RP輸出時的厚度來克服這個缺點，成品如圖17所示。RP完成之後，再以光硬化樹脂之RP原型再進行傳統矽膠模具製作與灌模複製，灌注樹脂與拆模成形過程中使用了樹脂、滑石粉、石粉、色粉（打底色），硬化成形



▲圖16. 多角度頭骨與下顎觀察與測量。

Figure 16. Multi-angle observation and measurement of the skull and mandible jaw.

圖片來源：邱鴻霖提供

後再加以修整噴砂研磨表面與合模範線（圖18）。

紫外光硬化（UV curing）技術，是由1970年代開始發展的綠色技術，其優點是製程不會有有機溶劑的揮發，可以減少能源的浪費，紫外線硬化樹脂不含有機溶劑，可避免溶劑對大氣層與環境

污染的危害。依據樹脂的成分與硬化方式，紫外線硬化樹脂符合綠色化學的四項原則：（1）化學反應的產物應是無毒和環境友好的；（2）能量利用率應達到最高；（3）化學反應不需要溶劑；（4）化學反應可以在常溫、常壓下進行（王沛雯，2011）。



▲圖17. UV Curable Acrylic Plastic光硬化樹脂RP輸出「原型」之各角度。

Figure 17. The UV Curable Acrylic Plastic RP output.

圖片來源：邱鴻霖提供

RP輸出於馬路科技顧問公司臺北總公司進行，RP輸出機型：美國3D Systems Projet HD 3,500，材質：UV Curable Acrylic Plastic，輸出堆疊層厚：0.032 mm，輸出厚度：5 mm，顏色為象牙白半透明。本研究中RP採取顱部與下顎分離製作，除了可減少變形機會，也可以獲得更精細的下顎骨與顱底的呈現。經測量RP輸出之成品，各部位之測量偏差以縮小為主，但縮小比例並不高，各部位偏差值介於0.15~0.05 cm之間，對於後續複製與顏面復原工作之影響甚小。為節省成本與克服後續顏面復原工作需要多件複製品，後續將以此「RP原型」製作矽膠模具，以環氧樹脂灌製模型，以供未來顏面復原所需之基礎骨架與教育展示之用。



▲圖18. 左上：隔離處理；右上：澆淋矽膠；左下：不飽和聚脂半成品；右下：噴砂著色。

Figure 18. Isolated treatment (top left), poured silicone (top right), epoxy semi-finished products (bottom left), sandblasting coloring (bottom right).

圖片來源：邱鴻霖提供

(三) 仿真複製成果

有了高精度的複製骨架後，還必須在環氧樹脂模型上進行仿真著色與骨質質感表現。這個工作雖不需要精密的儀器，卻是整個仿真複製過程中最關鍵的步驟之一，必須具備高度的美術表現能力（圖19）。亮島人頭骨複製過程中，以壓克力顏料、油性噴漆上色。複製與仿真美術表現，委託樹德科技大學應用設計研究所碩士班吳彥宏執行。複製成品在尺寸、顏色與質地的表現上俱符合研究與展示之需求，人骨填補以調和蠟填補部位，以異於人骨之顏色區別。複製品各部位與真品之測量誤差值僅介於1~2 mm。仿真效果上，測試非考古學與體質人類學專業人士，於1公尺距離以上，多數人無法確認真品與複製品之別。



▲圖19. 複製品的仿真美術表現（由樹德科技大學應用設計研究所碩士班吳彥宏執行）。

Figure 19. The simulation art performance of the replica (By Wu Yian-hong).

圖片來源：邱鴻霖提供

透過複製品進行人骨上的體質特徵觀察，效果與體質觀察記錄結果亦與真品相同，可見在展示教育與學術上都能符合要求。雖已達到一般人難以區別真假，但仍有改進之處。例如牙齒的質感表現，由於單一材質的侷限，翻模複製的頭骨全體以環氧樹脂為基材，在骨質的表現上較無困難，然而對於牙齒表面瑛瑛質的光澤質感，與附著於牙齒表面牙結石的整體仿真表現則仍待克服。

(四) 顏面復原

傳統顏面復原手法以壓克力條與黏土為基材，以手工進行肌理柱高度標示、肌理堆雕與皮膚貼附，完成後以矽膠與樹脂固定與翻模。這樣的作法僅能展現一種風格，需要調整時往往只能重頭重新製作。未來期待以3D掃描數值檔案為基礎，依據法醫人類學數據進行肌理貼覆，於電腦中進行數位雕塑，可以容許重覆調整與增添更多變化模組。

另一方面，在電腦中也可藉由考古學研究所呈現的古代社會文化與自然環境做為背景，透過數位特效為復原顏面進行膚色、膚質紋理、瞳孔色、眼褶、髮型、鬚鬚、唇形、鼻形、紋身紋面、裝飾品等特徵的組合變換，甚至是賦予動作情境與顏面的情緒表情，提供復原樣貌更多可能的想像空間。

七、討論與展望

從本文中包括各方面的討論與案例，筆者以考古學與體質人類學研究者的角度，透過亮島人3D掃描與逆向輸出相關工作經驗，在此提出幾點過程中所見、所思與有待克服之處進行討論。

(一) 掃描技術

從3D掃描的技術層面而言，最主要有三方面的問題包括：精密度（微痕觀察）待提升、人骨in situ狀態（人骨仍在土壤中）的死角克服、光線散射問題。其中，針對骨骼修復材質（石蠟+蜜蠟混合材料），出現透明與光澤度高部位掃描散射，產生大面積掃描數據空白或不連續區域，必須藉由噴覆其他媒材（二氧化鈦）以及貼覆反光貼紙做為反射與定位媒介。如何盡量避免媒材與文物直接接觸？並評估這些媒介對各種材質文物的可能影響，亦是必須正視的問題。從保護文物為最優先的立場而言，不論是業界或學者，處理重要文物時的標準作業程序、生汗防護裝備、實驗室環境與人員訓練，以及對於各類掃描光線（藍光、白光、紅外線等）的穿透性或發生溫度，對骨骼或各種不同材質文物的破壞性評估必須建立，這些都是不可輕忽的課題。

從設備的效能而言，3D掃描的速度與電腦效能的不斷快速提升，除了可以大量有效率記錄物件之外，考古出土遺物大部分在形態上（形狀上）都是具有獨特性（unique）的物件，其形狀、顏色的掃描資訊本身就提供了屬性辨識的基礎資料。因此，掃描除了記錄形態之外，或許可以同時提供辨識「材質成分」（如：SEM-EDS的功能，或與ICP-MS質譜儀結合），這僅是筆者的想像，但或許是下一步可以嘗試的方向。此外，同樣是進行3D掃描，具穿透性的CT斷層掃描技術在結構重建或複製上似乎更具有未來性，可以達到物件外部與內部同時全面掃描的目的，輸出的複製品

也可以提供破壞性的解剖觀察之用。

從設備本身的適用性觀察，目前市面上的設備所設定的使用環境皆為室內或是一般室外環境，並未針對野外使用而進行特殊設計，而考古現象的3D掃描往往必須在人煙罕至的偏遠地區，或面對酷熱、酷寒或潮溼的極端，也需要如聚落、城址、墳陵等大面積遺址之長時間現地掃描，因此設備本身的電源續航力、抗震防水與攜帶性，對考古學研究上的適用性而言亦是相當重要的一環，不論是以手持式或無人載具（UAV）進行空中正影像（Stereo image）編輯，都需克服這些最基本的適用性課題，才能更廣泛的被考古學研究所運用。

（二）快速原型成形（RP）

Rapid prototyping快速原型成形技術發展快速，透過3D掃描數據或是虛構的設計圖檔快速將物件進行「形狀上」的輸出，除了依照原尺寸也可以放大縮小。但是RP輸出的原型物件並非無可挑剔，似乎在技術的開發上也到了瓶頸點。透過南科史前人與亮島人研究的經驗，筆者在此提出幾點觀察與討論，期待相關業界或技術開發者能夠針對這些問題繼續進行研究。首先，輸出的細緻度有待再提升，細部紋理的表現上仍較傳統矽膠翻模製品粗糙，其關鍵可能在輸出材質與方式上，射出噴嘴的孔徑影響精細度，線性堆疊成型所造成的紋理仍必須透過後製處理才能消除，是否有可能跳出這種成型技術，開發出更高精密度的成形方法？從輸出材質的選擇性而言，雖然有幾種由廠商開發的材質可供選擇，但是同一輸出物件只能使用單

一材質是一大侷限，多樣複合材質的開發與同時運用，是未來值得期待的技術提升方向。

除此之外，RP輸出的尺寸上也仍有侷限，人類頭骨大小的尺寸對目前的RP輸出設備而言已是上限，更大型的物件必須將檔案分割輸出後再拼合組成原件，往往在檔案切割與輸出原型拼合的過程中會產生接合痕，也非常容易造成精確度上的誤差。另一方面，也建議技術開發者，針對各種不同材質在不同的保存環境下（溫度、溼度、日曬光照）是否潛在著變形、變色、龜裂的疑慮，以提供使用者保存策略，以延長RP輸出物件的壽命。價格的親和性而言，RP輸出之價格仍偏高，一般難以支應多件複製，主要應該是這樣的設備仍尚未普及。未來單價若能降低，將可直接以RP模型上色仿真，不必再以矽膠翻模剝製，可以達到更細緻的效果。

目前也有彩色RP的輸出技術與服務，但是只限於少數的材質上，而且色彩的層次感、光澤質感與真實呈現原色的表現上，仍無法與人工仿真彩繪的效果比擬。RP輸出的原型雖有精確度高的骨架，然而實際的仿真效果仍必須藉由藝術家的彩繪來配合才能達到。這個缺點仍有很大的提升改進空間。

（三）精度需求、委託處理或採購設備

3D掃描技術在近十年來的發展令人驚異，不論是精確度、細緻度、儀器的可攜帶性、檔案格式的相容性等皆大大提高，除了大幅提升了應用層面的廣度與深度，快速發展所衍生的產業商機，

也令考古學界與博物館在經費上來不及周轉，往往設備仍未達使用年限，卻已過時必須淘汰之窘境。而現階段的精度水準，在不久的未來勢必又顯得落伍、不夠精密而必須重新掃描。然而，考古發掘的過程往往無法如出土文物般可以重新掃描，這似乎也讓問題再度回到源頭，考古發掘的本身就是一個無法逆轉的破壞過程，無法重新再掃描一次，因此必須審慎。綜合以上經驗，每個研究單位與研究機構的財務狀況不同，建議考量建構3D與逆向輸出設備時，應考量後續軟硬體維護更新成本、人員訓練與長期養成的可能性，以及RP耗材庫存，若無法獲得長期的經費支援，委託民間專業公司機構進行相關工作亦是一個對策。期待在不久的未來，3D掃描與RP逆向工程設備能如同數位相機與辦公室印表機一般的普及。

八、結語

最後，從考古學的角度再看，3D技術確實提供了考古記錄工作在「技術」層面上的飛躍提升。但是，究竟有什麼樣的研究取向，必須使用3D技術才能達成其研究目標？3D技術提供我們激發出什麼樣的考古學研究新議題？逆向工程所輸出的複製品，對考古學研究有什麼實際的幫助？另一方面我們也必須思考，博物館運用這些技術所希望展示的是聲光影音效果、仿真物件還是考古學知識？一如利用人骨、墓葬的展示陳列方式，究竟是希望創造視覺上的驚悚效果以吸引觀眾注意？還是希望介紹體質人類學與考古學知識？如果只是盲目進行3D掃描與逆向複製文物，而沒有配合有「問題意識」的考古記錄與研究，3D

掃描與逆向輸出對於考古學的意義就無法發揮。換言之，能夠在研究的設計與操作過程中有效運用這些日新月異的新技術創造學術知識，才更能凸顯技術面的意義。

另一方面，在充分的研究背景下對出土文物進行掃描、複製與展示才有具體的意義，否則在光鮮亮麗與逼真的外表下，也只是虛有其表，更造成了龐大數據的堆積與資料儲存上的負擔。亮島人的3D掃描與PR輸出，到仿真複製過程，不僅是臺灣考古學在人骨複製上的先驅嘗試，也提供了臺灣考古學界在這個新技術運用上的反思與檢討契機，相信在未来的考古工作中一定會面臨相類似的問題，僅以這篇論文做為目前研究應用上的討論與註腳。

謝誌

本文得到中央研究院歷史語言研究所兼任研究員陳仲玉先生之支持，特此感謝。亮島人在修復、3D掃描、逆向輸出工程、仿真複製過程中，得到許多機構與專業人士的協助，其中包括：連江縣政府；文化部文化資產局文化資產保存研究中心李麗芳主任、邵慶旺先生與張舜孔先生，提供專業3D掃描與技術諮詢；國立清華大學人類學研究所何傳坤教授提供體質人類學指導；樹德科技大學應用設計研究所方惠光教授，指導碩士班生吳彥宏協助「亮島人」修復與仿真複製；國立臺南藝術大學博物館研究所碩士生詹凱雁協助墓葬繪圖與人骨清理；馬路科技顧問股份公司提供3D+RP專業諮詢與服務。謹此致上筆者之最高謝忱。

參考文獻

- 王沛雯（2011）〈紫外光硬化丙烯酸酯之研究〉，東海大學化學工程研究所碩士論文。
- 李濟（1931）《安陽發掘報告第三期》，中央研究院歷史語言研究所專刊之一，臺北：中央研究院，頁451。
- 何傳坤、邱水金、林德牧（2005）〈淇武蘭遺址出土墓葬現象與考古遺物翻製修復記〉，《國立自然科學博物館館訊》第213期，臺中：國立自然科學博物館，第二版。
- 邵慶旺、張舜孔（2010）〈立體量化模型應用於文化資產檢視紀錄與損壞檢測研究初探〉，《2010文化資產保存科學國際研討會——非破壞檢測技術與應用》，臺南市。
- 東京大学総合資料館編集（1995）《ネアンデルタールの復活Dederiyeh: Neanderthals and Modern Humans》，東京：クラブ ジオ 21 行。
- 陳仲玉、邱鴻霖、游桂香、林芳儀、尹意智（2012）《馬祖亮島島尾遺址群發掘及「亮島人」修復計畫》，連江縣：連江縣政府出版。
- 臧振華、李匡悌、邱鴻霖、李志文（2011）《南科史前文化住民面部復原研究計畫結案報告》，國立臺灣史前文化博物館委託執行，臺東：國立臺灣史前文化博物館。
- Aleš Hrdlička (1914) *The Most Ancient Skeletal Remains of Man*. Washington, Government, Printing Office. (Smithsonian Institution Publication 2300)
- Barsanti S. Gonizzi, F. Remondino, D. Visintini (2013) 3D Surveying and Modeling of Archaeological Sites - Some Critical Issues - ISPRS Annals of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W1, 2013 XXIV International CIPA Symposium, Strasbourg, France.
- Charles Frederick Holder (1896) The Ancient Islanders of California. *Popular Science Monthly*, vol.48, March, Published by D. Appleton & Company.
- Chris Anderson著，連育德譯（2013）《自造者時代：啟動人人製造的第三次工業革命》，臺北：天下文化。
- Domingo Inés, Valentín Villaverde, Esther López-Montalvo, José Luis Lerma, Miriam Cabrelles (2013) Latest Developments in Rock Art Recording: Towards an Integral Documentation of Levantine Rock Art Sites Combining 2D and 3D Recording Techniques. *Journal of Archaeological Science* (40), page,1879-1889. Elsevier Ltd.
- Enkhbayar Altantsetseg, Yuta Muraki, Katsutsugu Matsuyama, Fumito Chiba Kouichi Konno(2013) Feature Extraction and Modification for Illustrating 3D Stone Tools from Unorganized Point Clouds. *The Journal of Art and Science* 03/2013; 12(1): 36-47.
- Harvati Katerina, Nandini Singh, and Elisabeth

Nicholson López (2011) S. Condemni and G.-C. Weniger (eds.), *Continuity and Discontinuity in the Peopling of Europe: One Hundred Fifty Years of Neanderthal Study*, 16, page 179-192. Springer Science+Business Media B.V.

Odutola Christian Amans , Wu Beiping, Yao Yevenyo Ziggah, Abdul Ozovehen Daniel (2013) The Need for 3D Laser Scanning Documentation for Select Nigeria Cultural Heritage Sites. *European Scientific Journal*, August 2013 edition vol.9, No.24 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.

Paul R. Franke (1933) Museum Acquisition for 1933. *Mesa Verde Notes*, Mesa Verde National Park, vol.4, no.1.

Walter J. Fewkes (1914) Archaeology of the bottom Mimbres valley. New Mexico, *Smithsonian Miscellaneous Collections*, vol.63, no.10, City of Washington, Published by the Smithsonian Institution.

赤澤威，資料來源：デデリエ・ネアンデルタール網站（2014），<http://www.kochi-tech.ac.jp/akazawa/index.html>，2014年8月1日下載。

Neubauer and Studnicka (2004) The Scanning of the Pyramids Project, Vienna Institute for Archaeological Science. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/viavias_article_Pyramids.pdf，2014年8月1日下載。

Remondino Fabio (2011)Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and

3D Scanning. *Remote Sens.*2011,3,1104-1138. ISSN2072-4292. <http://www.mdpi.com/journal/remotesensing>，2014年8月1日下載。

Smithsonian Institute, Digitization Program Office (2014) <http://3d.si.edu/>，2014年8月1日下載。

The Metropolitan Museum of Art, Digital Media department (2014) <http://www.metmuseum.org>，2014年8月1日下載。