

以光學 3D 掃描模擬中國書法傳統拓碑技術及泐損字復原研究初探—以嘉義市福康安紀功碑為例

鍾岳龍

摘要

3D 掃描技術在古建築及文化資產保存的應用近十年來已日趨普遍，亦發揮極大的輔助作用。目前從一些碑碣的保存維護，也可以見到 3D 掃描用來記錄和建模。然而單純由掃描碑碣外觀所建立的 3D 模型對習慣於使用平面的碑帖拓印版本來臨習書法的書家而言並沒有實質的幫助。所以本研究的目的主要藉由對碑碣文字的 3D 掃描，提取對書法研究有用的資訊。目前這個主題缺乏相關研究資料可以參考依循。而經過筆者自行設計的測試與分析得到兩個方向的初步成果是對書法領域的研究極具價值的：（一）從 3D 掃描獲取的文字碑板 3D 模型，能精確地提取文字表層外框，精準模擬傳統碑拓的效果，且避開傳統手工拓碑因各種人爲因素所造成的誤差，例如用墨量影響字的粗細等。（二）對於表面泐損的文字，傳統拓碑拓出結果是一片大面積的空白；然而利用 3D 掃描所獲取的文字 3D 模型，卻可利用殘留底部的文字筆畫刻痕線索回推延伸，還原出未泐損時碑文的原始外框樣貌。這研究成果將有助於風化的石質古碑碣、劣損的木質楹聯匾額和古器物銘款的文字辨識。

關鍵詞：碑帖學、3D 掃描技術、拓碑、泐損字復原、文化資產保存維護

A Preliminary Study on Using the Optical 3D Scanning Technology to Simulate Traditional Stone Tablet Inscriptions Rubbings and to Restore the Damaged Characters: Taking the Fu Kang An Ji Gong Monument in Chiayi City as an Example

CHUNG Yueh-lung

Abstract

The application of three-dimensional(3D) scanning technology in the conservation of ancient buildings and cultural heritages has become increasingly common in the past decade, and it has also played a great auxiliary role. At present, from the preservation and maintenance of some monuments, 3D scanning can be seen for recording and modeling. However, the 3D model created by simply scanning the stele’s appearance has no substantial help for calligraphers who are accustomed to using flat rubbing versions of stele inscriptions to learn calligraphy. Therefore, the purpose of this study is to extract useful information for calligraphy research through 3D scanning of stele characters. At present, there is a lack of relevant research data on this topic to refer to. After the author’s self-designed testing and analysis, the preliminary results obtained in two directions are extremely valuable for the research in the field of calligraphy: (1) The 3D model of the tablet obtained from 3D scanning can accurately extract the outer frame of the text surface, accurately simulate the effect of traditional tablet rubbing, and avoid errors caused by various human factors in traditional manual rubbing, such as the amount of ink used to affect the thickness of the characters, etc. (2) For the text with damaged surface, the result of traditional rubbing is a large area of blank; however, the 3D model of the text obtained by 3D scanning can be pushed back and extended by using the traces of the text strokes at the bottom of the residue to restore the original appearance of the inscription when it was not damaged. The research results will be helpful for the identification of the weathered stone ancient tablets, the damaged wooden couplet plaques and the inscriptions on ancient artifacts.

Keywords: Chinese Calligraphy, 3D Scanning Technology, Stone Tablet Inscription Rubbing, Restoration of Damaged Characters, Cultural Heritage Conservation

一、前言

2018 年，在一次觀看西安碑林博物館的拓碑視頻時（圖 1），腦中突然不斷湧出一些畫面和想法：何不試試 3D 掃描？這也許是筆者經營 3D 動畫模擬及電腦輔助數位設計行業二十多年所養成的職業慣性思維的直覺連結與反射。有了這樣的問題意識，於是開始不斷地構思並建立假設模型，然後積極尋求能將這個想法付諸實現的資源。2020 年在網路上搜尋國內的相關研究，雖然沒有找到直接應用在書法領域的相關研究，卻很榮幸找到一位曾經指導研究生運用 3D 掃描設備做古文物修護的教授同意指導我並願意大方提供其研究室的 3D 掃描設備來協助完成此研究，真是滿懷感恩。解決了設備的問題，本研究終於有落實的可能。

二、碑帖學簡介

（一）碑帖研究的歷程：從歐陽詢露宿索靖碑前談起

相信寫書法的人，應該都聽過大書法家〔唐〕歐陽詢（557-641）的這一則故事：一日出行，無意間看到書法家〔晉〕索靖（239-303）所寫的一通碑刻，久視不忍離去，看到日落了，便索性睡在碑旁過夜。「一直看了三天，把索靖書寫的碑文，一筆一畫全都手摹心記，牢牢地複印在他的大腦裏，這才一步三回頭地離開這通石碑…」¹ 在那個時代雖然已經有了拓碑的技術，但應非隨手可得，故人們對影像的複製傳遞，多半還是要憑視覺和大腦的記憶來完成。

將重要的文字內容刻鏤於金石以象徵傳之久遠，古今中外皆然。然因金石不易移動，故其文字或圖像的傳播與再現，除了需憑藉書法家或藝術家敏銳的視覺觀察、大腦的記憶和專業的巧手來重現之外，「傳拓技術（Rubbing Technique）」的產生，在歷史上扮演著非常重要的角色。「摹拓技術在西方直至 19 世紀才得以流行…但是在中國，銘文刻畫的墨拓至少在 6 世紀就已經出現。在隨後的數百年中，這一技術逐漸發展為保存古代摩刻和流布法帖的一種主要方式…」²

傳拓技術普及之後，「拓片」內容的精良與完整性，成為藏家收藏拓片版本價值的判斷標準，「碑帖學」於焉產生。碑帖學是書法研究非常重要的一門領域。碑帖學中把「碑」和「帖」依其拓片屬性、來源、目的等劃分為兩個領域：

1. 「碑（Ink-Squeezes, Rubbings）」：「…包括碣石、摩崖、碑版、墓碑、墓誌、塔銘、造像題記、經幢、石闕銘等數十個品種…原始功用就是要使所記錄的歷史事件、歷史人物通過銘刻而流傳千古，其刊刻目的很明確是讓後人去『讀』的。」³ 然因記錄重要歷史事件、歷史人物的碑刻多是請當時名書法家書丹後由名工匠銘刻的，故該碑文之書法往往成為後人臨摹的經典。另外在清末民初盛行的「碑派」書法家，也鼓勵書家臨摹大量新出土的南北碑文以爲書法藝術注入新的養分。

2. 「帖（Model Calligraphy）」：又稱「法帖」，「…包括叢帖、匯帖、單刻帖等…功用是以記錄和傳播書法名作為基本出發點的，進而為讀書人提供學習書法的範本，其目的也很明確，就是讓人們去『臨』

（臨摹）的。」⁴ 「『帖』的出現比『碑』要晚很多；他在十世紀的發明可被解釋為來自印刷的影響。」⁵

碑帖學的演進與時代的工藝與科技背景息息相關。如今精湛的網版印刷術結合十九世紀出現的光學照相攝影術和二十世紀的資訊電腦科技，讓碑帖的複製和傳播都變得極爲容易且精緻。

臺灣在 2002 年推動的「兩兆雙星」計畫，將「數位內容（Digital Content）」產業列爲重點推動項目，之後又推動「數位典藏（Digital Archives）國家型科技計畫」。這個計畫大量運用了光學 2D （平面）掃描技術，把大量古籍、書畫、拓片…等等平面媒材經由 2D 掃描技術或數位照相技術，把平面紙本轉成電子檔保存起來。國內知名的「何創時書法藝術文教基金會」將其書畫收藏品經由高解析度 2D 掃描器轉成數位檔，然後用高解析數位列印設備輸出成高仿真的書畫複製品，即是書畫類數位典藏的典範應用案例。那時 3D （立體）掃描設備成本還過高，未能普及。如今光學 3D 掃描已經普及化，未來 3D 掃描運用在立體文物的數位典藏及相關研究運用應該會與日俱增。本研究使用光學 3D 掃描技術來補足過去碑帖研究所無法處理的問題，也算是善用時下的新科技。

（二）千百年來困擾書家的片片殘白：談碑帖中的泐損字

對碑帖中經常參差出現的那一片片不規則的殘缺空白，書家習以「泐損字」來稱呼之，如（圖 2）。「泐」字的起源甚早，於春秋末、戰國初成書的《考工記》即有載之。〔宋〕林希逸《考工記解》：「天有時以生有時以殺，草木有時以生有時以死，石有時以泐，水有時以凝有時以澤，此天時也…石最堅，亦有時而泐。泐，裂也。」⁶ 這裡的「泐」指的主要還是來自自然環境、天候的風化及磨耗。對於歷史上大家爭相摹拓的知名碑石，還有因拓碑者過多、摹拓頻率過高所造成的人爲磨損，以及一些自私的拓碑者，爲保有其拓本的獨一完整性和價值，而蓄意在事後敲壞某些碑文所造成的人爲破壞。

千百年來，書家們根深蒂固地以碑拓的「版本」來判斷碑帖之優劣，對泐損字造成的空白則習慣地接受並忽而略之，鮮少深入追究其原碑版樣貌。直到最近四、五年來，坊間某些專業出版碑帖的出版社，開始出版發行碑石照片與拓片並存對照的所謂「碑刻拓對勘本」、「原石拓本比對本」等，如（圖 3）、（圖 4）。就原碑尚存可供比對的狀況下，現代的「光學照相攝影術」的確能起相當大的輔助判讀作用。（圖 3）右側「猛龍」二字爲該書作者對〈張猛龍碑〉原碑作高清攝影，來與左側引自北京師範大學出版社出版之啟功先生藏《明拓北魏張猛龍碑》拓本之「猛龍」二字相比較，發現碑石照片確實能比拓片提供更多的細節資訊。然而照片中高清（高解析度）的筆畫因受同樣高清的殘泐石花所干擾，只能約略讀出原字跡概況，無法定出真實筆畫線條輪廓來。（圖 4）所示〈韓仁銘〉新拓本、清乾隆年間拓本與原石照片三者對勘比較圖中，中間的原石照片，反應出一般刻碑原石石花對碑文閱讀的干擾。可見原石照片雖提供比拓片在泐損字上更多的細節，卻喪失拓片利用強烈黑白二元對比，簡單而明顯地勾勒線條筆畫的原始特性；而該特性正是傳統摹拓技術千百年來讓書法臨寫者所習於接受的。本研究正好同時解決了拓片與原石照片各自存在的問題。

⁴ 同上註，頁 1。

⁵ （美）巫鴻，〈說「拓片」：一種圖像再現的物質性和歷史性〉《時空中的美術：巫鴻中國美術史文編二集》（北京：生活·讀書·新知三聯書店，2016），頁 84-85。

⁶ （宋）林希逸，《考工記解》《文津閣四庫全書·考工記解·卷上·第 89 冊》（北京：商務印書館，1983），頁 488。

三、3D 掃描模擬傳統拓碑及泐損字修復之假設模型建立

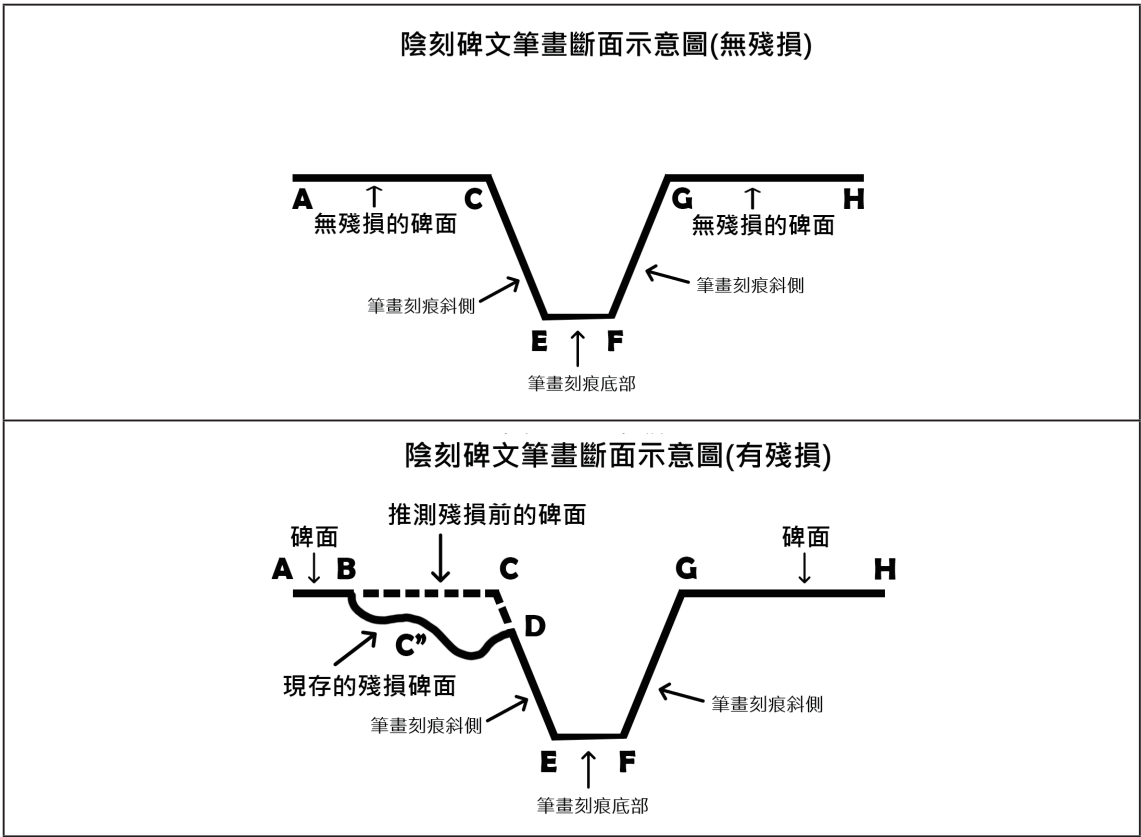
在進行本實驗研究之前，先把研究內容，包括欲解決的問題、解決方法的實驗設計、操作流程及預期成果等，抽象簡化為以下幾個假設模型來輔助思考。以下所列舉的假設模型主體，乃截取碑文中某一筆畫的「垂直碑版表面之截斷面」來看，假設模型中的楔型凹槽，如（表 1）上圖之 C-E-F-G 線段，即代表該筆畫刻入碑版的斷面圖。

（一）碑版上陰刻碑文之筆畫斷面假設模型

1. 陰刻碑文之無殘損筆畫斷面：如（表 1）上圖圖示，A-C 線段及 G-H 線段代表無殘損之碑面；C-E 線段及 F-G 線段代表無殘損之碑文筆畫刻痕之兩個斜側；E-F 線段代表碑文筆畫刻痕之底部。

2. 陰刻碑文之帶殘損筆畫斷面：如（表 1）下圖圖示，B-C''-D 不規則線段，代表由原來完好無缺之 B-C-D 表面，經過岩石表面泐損後所形成之殘缺斷面。

表 1：碑版上陰刻碑文有無殘損筆畫之斷面假設模型比較表



（二）傳統拓碑技術的假設模型

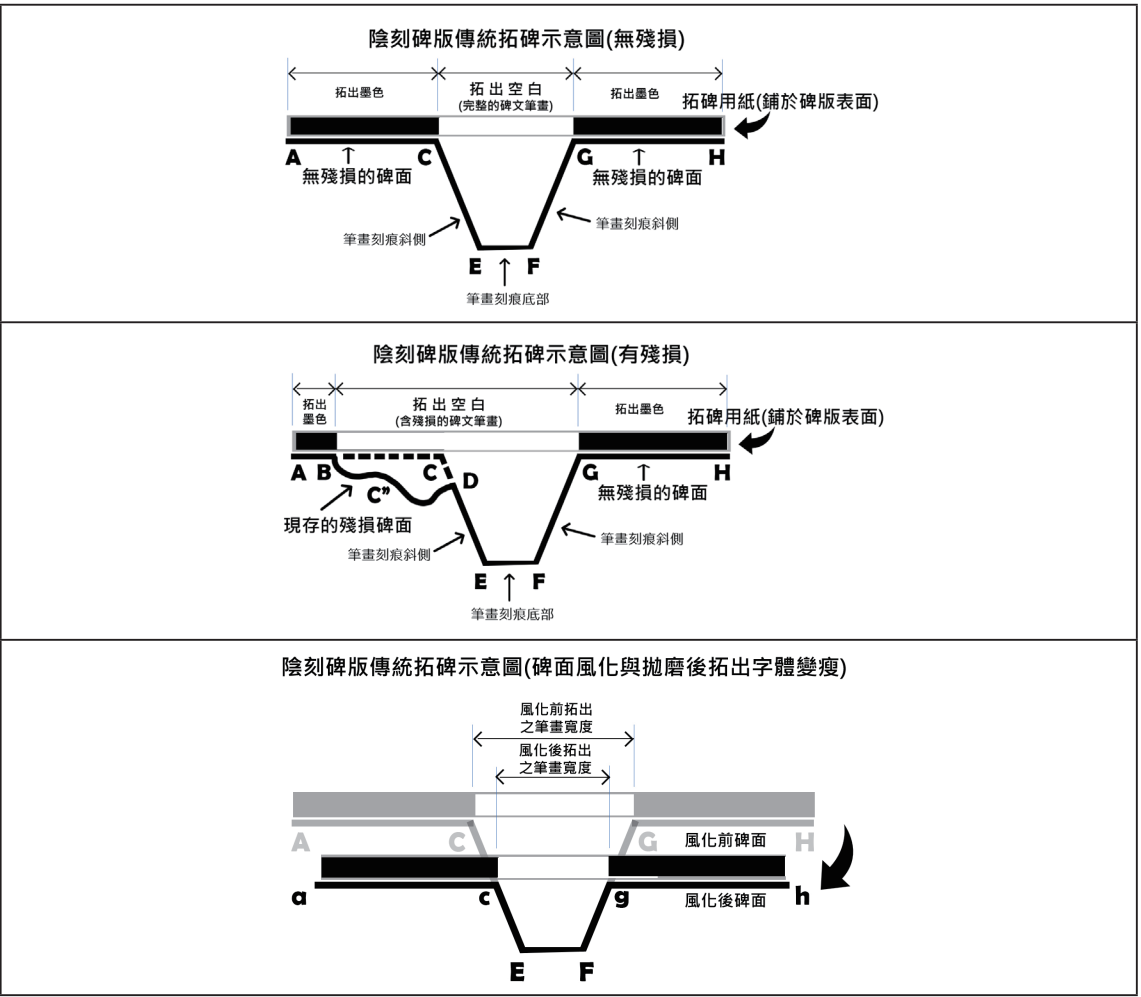
傳統拓碑法乃將拓碑用宣紙緊貼碑面，如（表 2）圖示所示。拓包撲墨槌拓時，緊貼碑面的宣紙直接受力，拓出墨的黑色；而碑文筆畫凹槽的部分則不受力、不吃墨，維持宣紙原來的白色。

1. 陰刻碑文無殘損筆畫之傳統拓碑法模型：如（表 2）上圖圖示，A-C 線段及 G-H 線段代表無殘損之碑面，拓碑時上面的宣紙直接受力，拓出黑色；C-G 線段代表無殘損的碑文筆畫凹槽部分，拓碑時上面的宣紙不受力，維持宣紙原來的白色。

2. 陰刻碑文帶殘損筆畫之傳統拓碑法模型：如（表 2）中圖圖示，A-B 線段及 G-H 線段代表無殘損之碑面，拓碑時上面的宣紙直接受力，拓出黑色；B-G 線段則同時跨過殘損的碑面及碑文筆畫凹槽部分，拓碑時上面的宣紙不受力，維持宣紙原來的白色。

3. 陰刻碑版傳統拓碑之碑面風化與拋磨影響模型：碑版因長年自然風化而磨損或受人為拋磨整理而減少厚度（碑面下降），導致碑文字口變窄，使得傳統拓碑法拓出的字體變瘦。如（表 2）下圖圖示中，A-C 線段及 G-H 線段代表風化或拋磨前之碑面，此時傳統拓碑拓出的碑文筆畫寬度為字口 C-G；a-c 線段及 g-h 線段則代表風化或拋磨後之碑面，此時傳統拓碑拓出的碑文筆畫寬度為字口 c-g。依假設模型來看，碑文筆畫寬度變窄了。這個現象可以解釋（圖 4）〈韓仁銘〉左邊新拓本為何比右邊清乾隆年間拓本字體明顯變細瘦了。

表 2：碑版上陰刻碑文有無殘損筆畫及風化影響之傳統拓碑法假設模型比較表



（三）以 3D 掃描技術做數位拓碑及復原泐損字原始樣貌的假設模型

本研究擬以無接觸、無破壞的光學 3D 掃描技術，來模擬中國書法傳統拓碑技術。因屬筆者自創的實驗性工法，對比傳統拓碑法（Rubbing），姑且簡單命名為「數位拓碑法（Digital Rubbing）」。

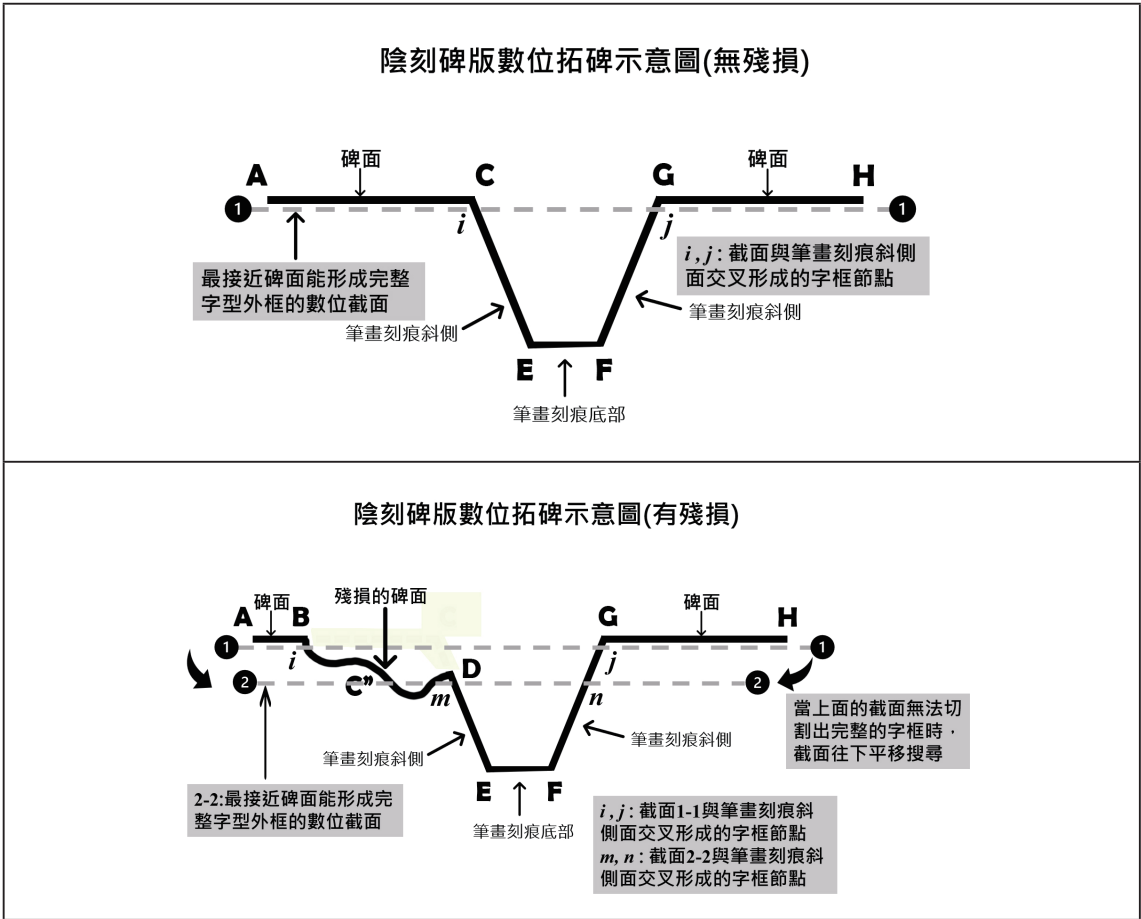
1. 陰刻碑文無殘損筆畫之數位拓碑法模型：如（表 3）上圖圖示，3D 掃描所建構的模型，理論上與實物完全一致。為模擬傳統拓碑碑面平鋪的宣紙拓出碑文字形外框的物理特性，我們做出一個平行於碑面

的虛擬平面如 1-1 截面，這相當於一張虛擬的拓碑紙。不同於傳統拓碑紙只能平鋪於真實碑面上，這張虛擬的拓碑紙可以在碑面下方不同的深度移動，與不同深度的筆畫刻痕斜側面交會出不同大小的文字外框。如（表 3）上圖的 1-1 截面與 C-E 線段及 F-G 線段分別交叉於 i 和 j 兩個筆畫外框點。在無泐損的狀況下，取愈接近碑面的截面所截取的筆畫外框粗細愈接近傳統拓碑之結果；愈往下遠離碑面的截面所截取的筆畫外框粗細愈細瘦。

2. 陰刻碑文帶殘損筆畫之數位拓碑法模型：如（表 3）下圖圖示，B-C”-D 不規則線段，代表碑版泐損部分的斷面。此時 1-1 截面會跟殘泐的 B-C”-D 斜側面交叉於 i，與 F-G 斜側面交叉於 j，形成結果與傳統拓碑拓到泐損字般，得到的是不規則的字形筆畫外框。由觀察（表 3）下圖的假設模型，推測若將截面往下降到 D 點以下，如圖示之 2-2 截面，與 D-E 及 F-G 兩個筆畫斜側面各交叉於 m 和 n 兩點，理論上完整的筆畫外框將再度出現。

也就是說，依（表 3）下圖的假設模型推斷，如果泐損字表面殘泐岩層下還找得到碑文筆畫刻痕的根部，該碑文筆畫就有復原的機會。如（表 3）下圖碑版泐損斷面 B-C”-D，當 D 點位置不低於代表碑文筆畫刻痕之底部的 E-F 線段時，就有機會由 D-E 間的某個水平截面（如圖示 2-2 截面）找到原始筆畫的外框架構出來。當然，從較底部的截面所截到的筆畫外框會比從碑表面截取的筆畫外框細瘦，但其字型筆畫結構比例理論上是不變的。如（表 3）下圖的 m-n 是由截面 2-2 所截取的筆畫外框寬度，而推測該筆畫未泐損前的原始寬度應如（表 3）上圖的 C-G 寬度，或由截面 1-1 所截取的 i-j 寬度。屆時將截出的完整字形筆畫外框依 i-j/m-n 的比例，等比例放大回去即可。

表 3：碑版上陰刻碑文有無殘損筆畫之數位拓碑法假設模型比較表



四、研究標的石碑之選定與研究設備簡介

（一）碑碣及碑文文字之選定

本研究標的物為位於嘉義市中山公園入口處的[清]高宗乾隆皇帝（1711-1799）御筆的〈命於臺灣建福康安等功臣生祠詩以誌事〉碑（以下簡稱：嘉義市〈福康安紀功碑〉）（圖 5）、（圖 6）。何培夫《臺灣地區現存碑碣圖誌 嘉義縣市篇》記載此碑相關歷史資料：

碑名：命於臺灣建福康安等功臣生祠詩以誌事 年代：乾隆五十三年八月（西元一七八八年）
地址：嘉義市中山路 位置：中山公園內，近大門入口處 材質：花崗岩 形式：額刻御製，雙龍紋飾，邊框 43 公分⁷

其碑文內容考釋如下：

碑文：命於臺灣建福康安等功臣生祠詩以誌事

三月成功速且奇，紀勳合與建生祠。垂斯琬琰忠明著，消彼萑苻志默移。臺地期恆樂民業，海灣不復動王師。日為日毀似殊致（近年以各省建立生祠，最為欺世盜名惡習；因令嚴行飭禁，並將現有者概令毀去。若今特令臺灣建立福康安等生祠，實因臺灣當逆匪肆逆以來，荼毒生靈，無慮數萬。福康安等於三月之內，掃蕩無遺，全郡之民咸登衽席。此其勤績，固實有可紀；且令奸頑之徒觸目警心，亦可以潛消狼戾。是此舉似與前此之禁毀跡雖相殊，而崇實斥虛之意則原相同，孰能橫議？且勵大小諸臣，果能實心為國愛民，確有美政者，原不禁其立生祠也），崇實斥虛政在茲。

乾隆五十三年仲秋月御筆⁸

此碑雖為花崗岩材質，然因長年露天置於戶外，未曾加以特別遮蔽或保護，自然風化的結果導致碑文字口均已呈圓潤貌。可以預測其拓印出來的文字外框線條也會偏向圓潤。部分文字表面有各種不同程度的岩石泐損剝落，其中泐損未深及筆畫刻痕底部者，可以用來做復原的研究。例如碑文中漢文部分最後一行：「乾隆五十三年仲秋月御筆」，本文選定字跡外框較完整的「御」字和「福」字為代表，來做模擬拓碑的研究；選定表面有泐損的「五」字來做泐損字復原的研究。碑文中漢字字體分大小兩種尺寸：前後正文部分為大字，每字長寬各約 4.5 公分；中間有六行說明小字，每字長寬各約 2.5 公分。本研究所採用之單一文字「御」、「福」、「五」等字均為長寬各 4.5 公分的大字。

（二）3D 掃描設備介紹

3D 掃描技術由於其非接觸性、非破壞性、低干擾與污染等特性，近一、二十年來已廣泛運用於各類文化資產保存、修護等領域。張舜孔，邵慶旺，蔡育林，陳俊宇〈3D 掃描技術應用於文化資產之適用性討論〉提到：

目前市售之 3D 掃描儀包含地載光達、雷射掃描儀、結構光掃描儀以及顯微 3D 等技術，此外，尚有車載掃描與空載掃描系統……各掃描儀運用的原理大致上可分為雷射掃描與結構光掃描兩類……⁹

⁷ 林文睿監修，何培夫主編，《臺灣地區現存碑碣圖誌·嘉義縣市篇》（臺北：國立中央圖書館臺灣分館，1994），頁 136。

⁸ 同上註，頁 137。

⁹ 張舜孔，邵慶旺，蔡育林，陳俊宇，〈3D 掃描技術應用於文化資產之適用性討論〉，《文化資產保存學刊》，第 26 期（2013）：頁 63-78。

本研究採用盧森堡 Artec 公司 (<https://www.artec3d.com/>) 出產的兩款 3D 結構光掃描儀 (Structured Light Scanner)：(表 4)

- 1.Artec Eva：最高精度 0.1mm，白光掃描技術。於本實驗中用來掃描整面碑版文字，以作為宏觀的展示。
(表 4 左圖)
- 2.Artec Space Spider：最高精度 0.05mm，藍光掃描技術。於本實驗中用來掃描單一個文字，以處理文字碑損處微觀的修復。(表 4 右圖)

表 4：Artec Eva 3D 掃描儀及 Artec Space Spider 3D 掃描儀 (Artec 公司網站產品型錄頁 2022)

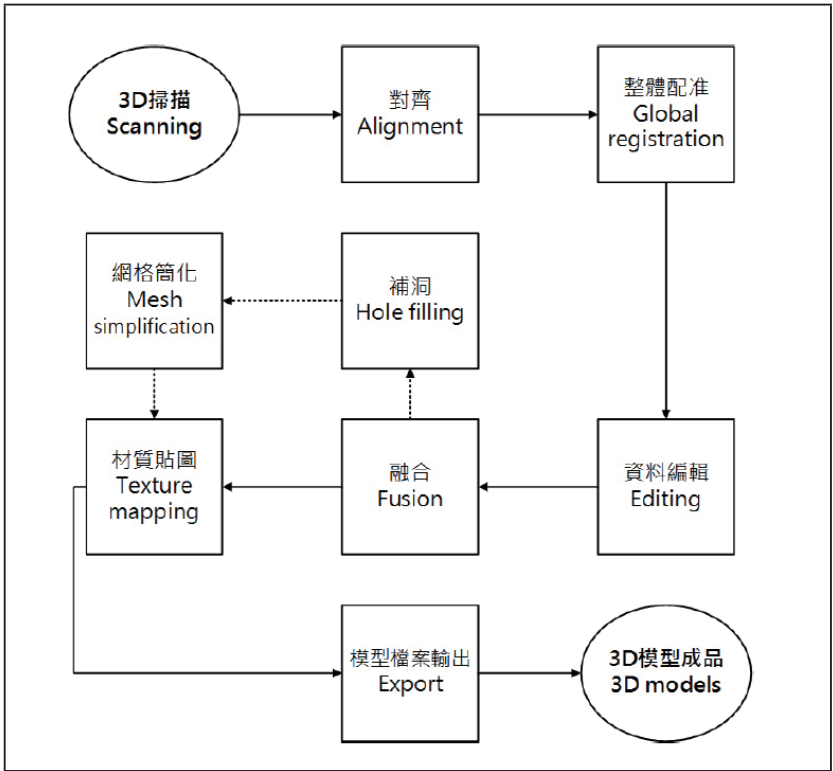
	
Artec Eva 3D 掃描儀 (https://cdn.artec3d.com/pdf/Artec3D-Eva.pdf) 掃描儀 (Artec 公司網站產品型錄頁 2022)	Artec Space Spider 3D 掃描儀 (https://cdn.artec3d.com/pdf/Artec3D-SpaceSpider.pdf)

3D 結構光掃描儀模型處理程序簡述如下：(表 5)

使用高解析度的 3D 結構光掃描儀，獲得文物表面起伏及色彩之掃描資料後，需再將掃描資料進行拼接、配準、融合並轉換為三角網格模型。模型經過補洞、減面及貼圖等後製程序後，輸出成為所需的檔案格式及大小，供虛擬修復或其他用途的 3D 模型。¹⁰

¹⁰ 吳禮文，〈3D 虛擬修復應用於考古陶質文物—以潮來橋遺址文物為例〉（碩士論文，國立雲林科技大學文化資產維護研究所，2018），頁 21。

表 5：3D 掃描模型處理程序 (陳柏元 2015)



(三) 3D 掃描數據之後續處理與分析軟體

3D 掃描設備於現場進行掃描所採集的石文 3D 數據原始資料，需經過軟體進行整合與分析以產出有用的資訊。本研究在處理數據的過程中，盡量避免軟體提供的自動優化功能，以維持原始數據的真實性。本研究採用的軟體如下：

- 1.Artec Studio®：這是盧森堡 Artec 公司搭配其 3D 掃描設備的數據處理與建模軟體。本研究中，利用其「截面」的功能，將單一文字的 3D 模型，在該字無泐損的情況下提取最接近碑面的一層平行碑面的截面，來截取該文字的數位拓碑外框即可；若該字表面有泐損，則當提取最接近碑面的平行截面所得到的文字外框，必然是如同傳統拓碑般拓出一片大面積的空白一樣，表現在數位模型上則是大面積不規則形狀的弧線外框。此時由碑面往下每 0.2mm 做一個平行碑面的截面，直到離開岩石剝損層，即可求得完整外框字形。〈福康安紀功碑〉碑文刻鑿深度約為 2mm，為方便研究，對泐損字先往下平均做出不同深度的十層水平截面，以方便後續處理與研究。
- 2.Bentley MicroStation®：美國 Bentley Systems 公司 (<https://www.bentley.com/>) 開發的 3D 電腦輔助設計 (CAD) 軟體。在本研究中，由 Artec Studio® 所截出的單一泐損字的十層水平截面外框 3D 模型，在 MicroStation® 開啟各個 3D 視圖（如等角透視圖、頂視圖及前、後、左、右各側視圖等），逐層檢視，刪除不需要的殘損層，提取最完整層的外框，等比例放大到表面層，與原表面層未殘損部位的字框邊緣大小約當重疊一致，即可將該字未殘損前的樣貌還原出來。

- 3.Adobe Photoshop®：美國 Adobe 公司 (<https://www.adobe.com/>) 開發的影像處理軟體。用來處理平面影像加工及影像比對分析等。

五、研究結果與分析

實際對碑版碑文做 3D 掃描實驗，將實驗的結果與原先建立的假設模型互相印證，幸運地發現假設模型與實驗結果相吻合。茲將研究結果陳述如下：

（一）〈福康安紀功碑〉整體碑文之 3D 掃描結果及分析

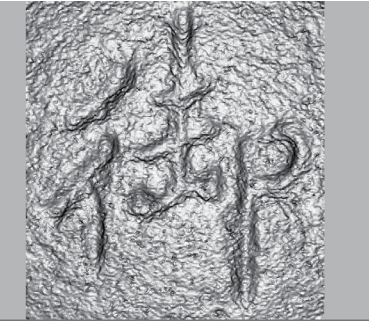
使用 Artec Eva（最高精度 0.1mm）來掃描整面碑版文字，所提取的整面碑文（漢文及滿文）3D 數據，經由 Artec Studio® 軟體整合後的 3D 模型，做單一顏色上色後，得出如（圖 7）的 3D 效果圖。可以與（圖 6）何培夫老師提供的高清照片做一比較。

（二）3D 掃描提取單一非泐損字表面外框以模擬傳統拓碑之結果及分析一以「御」字為例

使用 Artec Space Spider（最高精度 0.05mm）來對碑文之單一文字「御」字（圖 8）做高精度 3D 掃描，所提取的碑文 3D 數據，經由 Artec Studio® 軟體整合後的 3D 模型，做單一顏色上色後，得出如（表 6）右上圖的 3D 效果圖。可以與（表 6）左上圖的原石照片做一比較。上單一顏色的 3D 效果圖，比起原石照片，更能免於碑版石材花紋的視覺干擾，使碑文文字的辨識度更為提高。且對文字的 3D 模型進行上色演算（Rendering）時，更可以設定虛擬光線（含自然光源和各種燈具等所產生之光線）打光的角度和強度，讓文字的 3D 效果圖之筆畫更立體清晰可辨。

進一步對「御」字的 3D 模型，提取最接近碑面表層之平行「截面」，得出完整的模擬傳統拓碑效果的「數位拓碑」文字外框線如（表 6）左下圖示。針對這個外框線，即能利用影像處理軟體（如 Adobe Photoshop® 等），對文字外框線以外的部分填入黑色色塊，做出如（表 6）右下圖「黑底白文」的模擬傳統碑帖的「數位碑帖」。

表 6：碑文「御」字的原石照片、3D 掃描之 3D 模型效果圖、「數位拓碑」外框字和「數位碑帖」

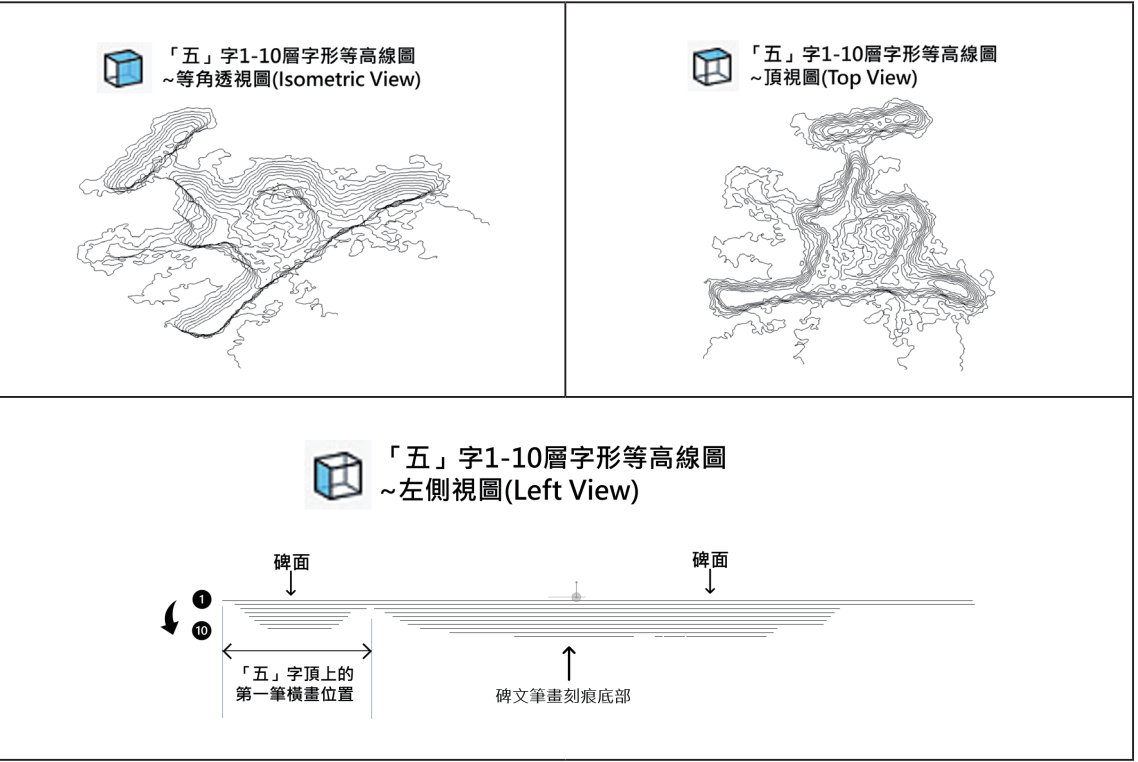
 「御」字原石照片	 「御」字 3D 掃描模型上單色之 3D 效果圖
 「御」字「3D 數位拓碑」提取之文字外框	 「御」字「黑底白文」的「數位碑帖」

（三）3D 掃描提取泐損字殘岩底下之完整文字外框以復原碑文原貌一以「五」字為例

碑文最後一行的「五」字，肉眼觀察其第二筆（豎畫）和第三筆（橫畫）的交叉部位有明顯的表層泐損，如（圖 9），故以此字來做為研究分析之對象。

使用 Artec Space Spider 對「五」字做高精度 3D 掃描，所提取的碑文 3D 數據，經由 Artec Studio® 軟體整合後，對此字的 3D 模型，進行沿碑面垂直往下每 0.2mm（毫米）做出一個與碑面平行的「截面」。由於字的刻畫深度距碑面約 2mm（毫米）深，故得出十組「截面」。每一個截面在不同深度與「五」字都切割出一個外框輪廓。將此十組「截面」的 3D 數據導入 3D CAD/CAM 電腦輔助設計軟體（本研究採用 Bentley MicroStation®），該字的 3D 模型便猶如「等高線地形圖（Topographic Contour Map）」般，清晰地展現出該字的微觀細節來。在此我們姑且稱之「字形等高線圖（Glyph Contour Map）」，分析如（表 7）。由（表 7）上左圖示的 3D「等角透視圖」（Isometric View），可以明顯判讀「五」字第二筆（豎畫）和第三筆（橫畫）交叉部位的明顯泐損程度。由（表 7）上右圖示的 3D「頂視圖」（或稱「上視圖」）（Top View）觀察到部分外框線條緊鄰集結、輪廓加深部分，「五」字的正確結構已可約略看出。另外由（表 7）下圖示的 3D 左側視圖（Left View）的仔細觀察，發現左邊「五」字第一筆橫畫下方的截面截出的外框與右邊其他筆畫外框斷開，僅碑面部分相接，代表「五」字第一筆橫畫與第二筆豎畫並無接觸或僅於碑面表層輕輕觸碰。

表 7：碑文「五」字 1-10 層截面「字形等高線圖」的各 3D 視圖

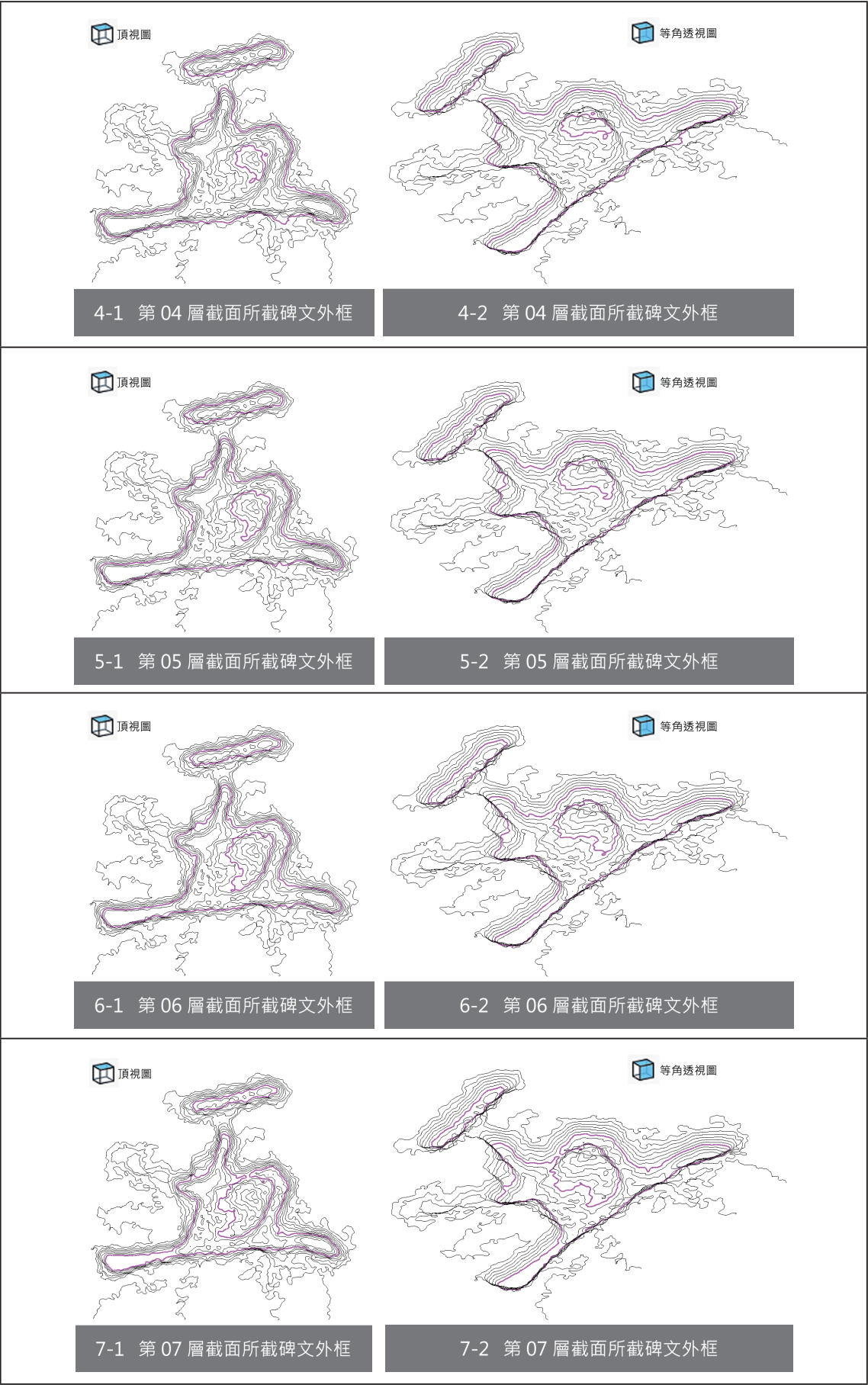
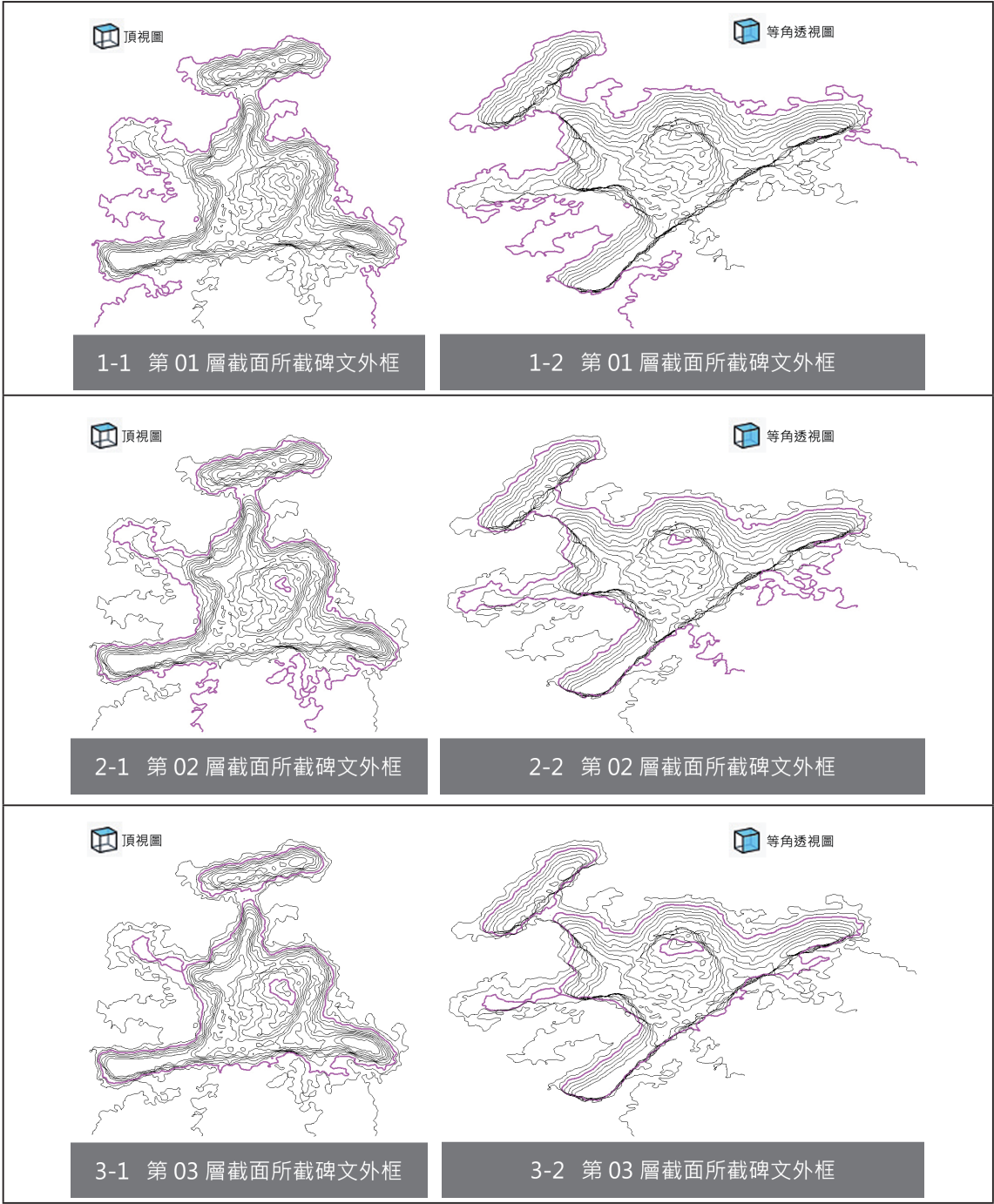


為清楚呈現一個表面泐損的碑文，如何在避開殘泐的岩層表面，在下方的截面重新現出完整的字形框架，我們將碑文「五」字的碑面下方一至十層截面，每層截面所截出的字形外框，表列於（表 8），每一圖示均以粉紫色粗線代表該層截出的字框，並以「頂視圖」和「等角透視圖」並列呈現，以方便判讀碑面下每一個截面所截出的「數位拓碑」效果。

由（表 8）1-1、1-2 圖示，可以看到最近碑表面的第一層截面所截出的字框，如果根據（表 2）「傳統拓碑技術的物理模型」，模擬對碑文「五」字做傳統拓碑的結果將如（表 9）所示之結果。

經由對十層截面，一層一層抽絲剝繭地檢視其所截出的字形框架，發現第四層（（表 8）4-1 圖示）「五」字開始擺脫渤損岩層的影響，出現較完整的外框；然而「五」字右下方包圍的「口」字形，則到第六層（（表 8）6-1 圖示）才出現較合理的外框大小。如果我們簡略地（不經精算縮放比例）取第四層的「五」字外框結合第六層「口」字形外框，結合成（表 10）的「數位拓碑」結果。這個結果是由實際碑石碑文狀況反應顯示出來的，沒有任何人為的修飾。當然之後也能像目前坊間流行的「修復」版習字碑帖，將原本殘泐字，憑著監製的現代書法家個人的專業判斷，經電腦 2D 影像合成軟體「修復」成完整的字形，以方便初學者臨習。但本研究旨在呈現碑文真實的數據和樣貌供學者後續的研究，故盡力排除各種人為主觀的判斷和修飾。

表 8：碑文「五」字的碑面下方 1-10 層截面所截出的「數位拓碑」效果



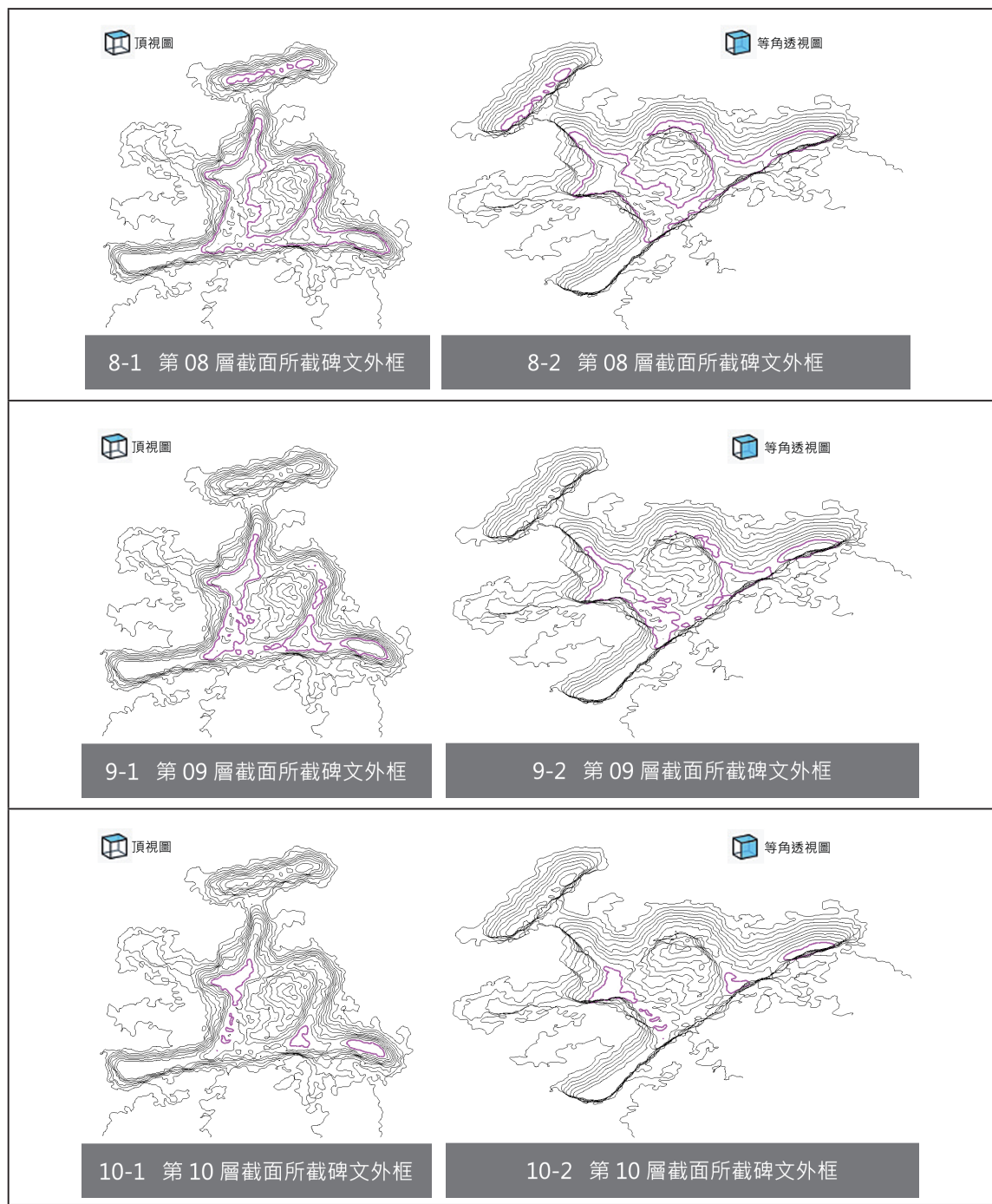


表 9：根據（表 2）「傳統拓碑技術的物理模型」，模擬對碑文「五」字做傳統拓碑的結果

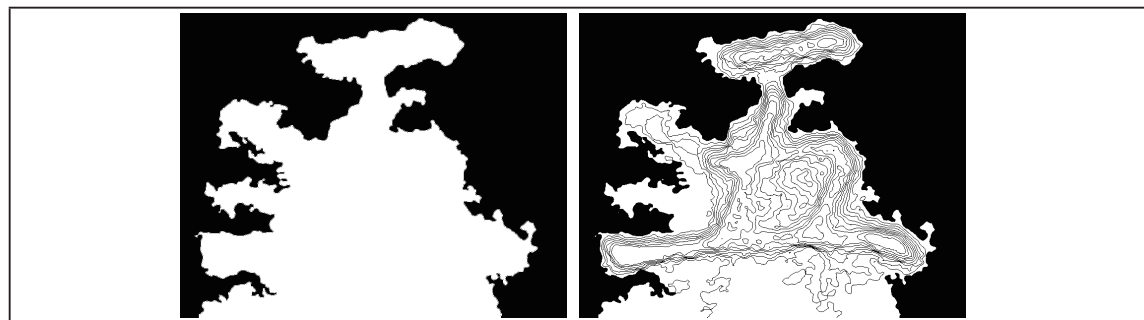
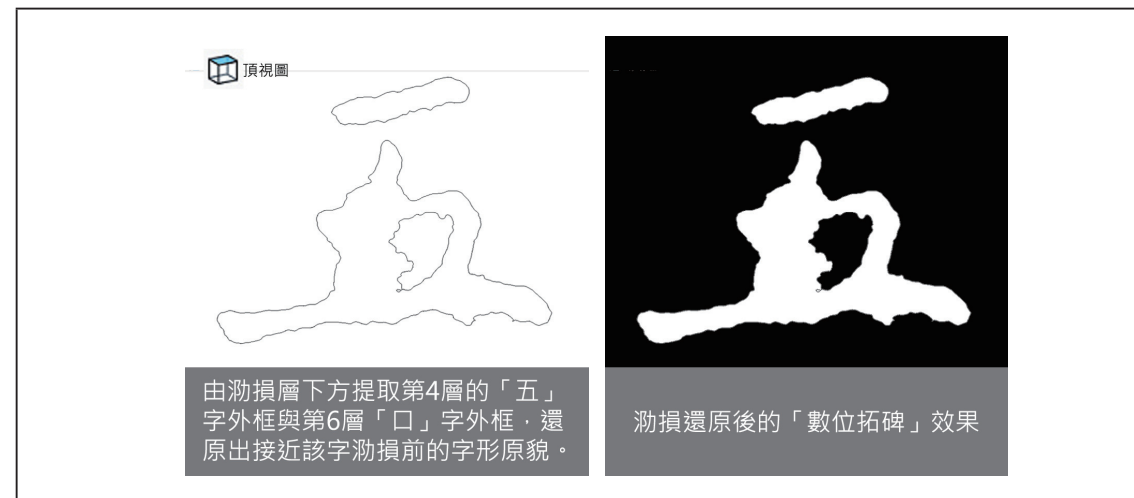


表 10：泐損的碑文「五」字，經 3D 掃描「數位拓碑」還原出來的結果

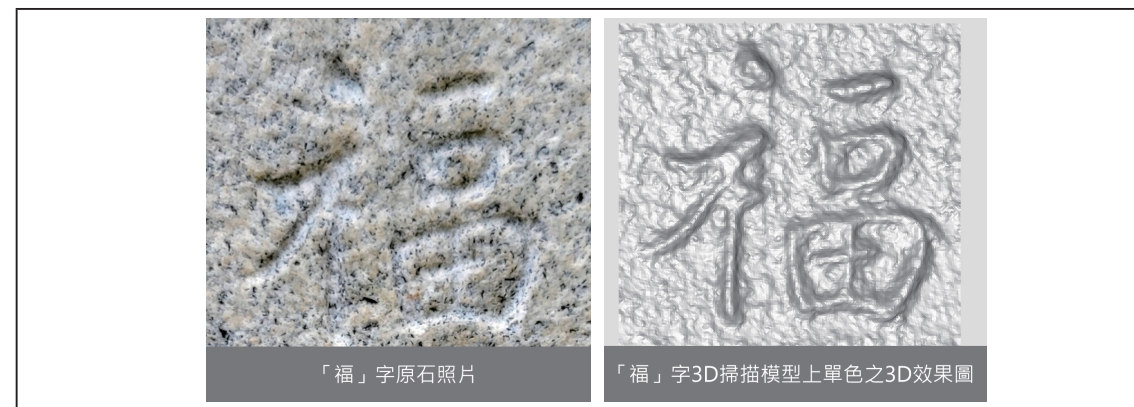


對泐損輕微不明顯的碑文 3D 掃描模型資料來做上述的截面「字形等高線圖」分析，通常會發現每一層截面所載取出的字形外框近乎是等比例的縮放關係，由上而下逐漸縮小。這是因為理論上鑿刻刀具在石板上刻字時，筆畫鑿痕兩個垂直深入碑版的斜側，理論上斜率是一致的。當然實際上一定會有誤差，但是比起在泐損的碑版表面上做傳統拓碑所得出的結果，這樣帶有誤差的結果，還是相對有參考價值的。如（表 11）為針對碑文第一行第六字的未泐損的「福」字所做出的「數位拓碑」結果。

另外，在傳統碑帖碑文判讀時，經常發生某些點畫究竟是字本身原有的點畫抑或是泐損的石花難以分辨的情況，造成碑文的誤判。例如「大」、「天」、「太」、「犬」等形似字周邊受泐損石花干擾時採用本研究的「字形等高線圖」分析，檢視點畫入石深度及該點畫各層外框線的一致性，亦能有效協助判別。

筆者設計這個由損泐層下方提取未損泐前完整字形外框的這個工法邏輯，可以想像成過去對表面損壞嚴重的古碑進行整理時，將表面石層拋光磨去一個厚度的概念。此時拓出的拓片字跡會變清楚，但字形會比早期拓本的字形明顯變瘦了。這時若再對碑文溝槽鑿寬，整個碑就等同是徹底被破壞了。而我們利用 3D 掃描技術，可以完全不對碑石造成絲毫接觸或破壞，就可以將泐損字還原。對於較下層截面提取出來的變瘦的字形，只要再經過如 Adobe Photoshop® 這樣的影像處理軟體，把該層字框「等比例縮放（Scaling）」到與該字表面帶泐損層字框中較完好部分的框線，近乎重合即可。理論上依此「增厚」後的字形，就是原來未泐損的碑表面應拓出的字形。這樣的修護是完全科學的，無接觸、破壞的。

表 11：未泐損的碑文「福」字，經 3D 掃描「數位拓碑」的結果





六、結語

本研究獲致初步創新成果有如下三項，相信是對書法碑帖研究極具價值的：

- （一）提供一個研究碑帖的簡易物理模型：為碑石本身（含天然泐損、自然風化、人為修整等現象）及碑拓行為（含傳統拓碑、3D 數位拓碑）等相關問題的思考和說明，建立一個簡化而可靠的物理模型。
- （二）「3D 掃描數位拓碑」工法的發明：從 3D 掃描獲取的文字碑板 3D 模型，能精確地提取表層文字外框，精準模擬傳統碑拓的效果，且避開傳統手工拓碑法中許多因各種人為因素和拓印材料品質等所造成的誤差，例如用墨量影響拓片字的粗細等。
- （三）「3D 掃描數位拓碑」泐損字修復工法的發明：對於表面泐損的文字，在利用 3D 掃描獲取文字 3D 模型後，可由殘留底部的文字筆畫刻痕線索還原出未泐損時碑文的原始外框樣貌，解決千百年來傳統拓碑遇泐損字時拓出一大片空白的問題。

「3D 掃描數位拓碑」工法還具有如下優點是傳統拓碑所無法達到的：

- （一）無接觸、無破壞：近年古蹟文物保護意識抬頭，許多書法名碑均已為相關單位所保護，很難再對其施以傳統拓碑工法。此時利用「3D 掃描數位拓碑」工法，利用其對古文物無接觸、無破壞的特性來做研究，更能具體落實對古文物的保護。

- （二）將歷史文物「凍齡」起來：在研究碑帖的歷程，總會發現一個碑帖的拓片，隨著時間的腳步逐漸發生變化，後拓的版本因原石的日益泐損而逐漸模糊。加上天災、人禍及戰亂等因素，許多珍貴的原石、拓本、複印本等都已消失無存。利用 3D 掃描的新科技，可以將研究物件的全部或局部，藉由 3D 掃描，將其目前最佳的狀況，轉化為數位檔保存起來。相當於完整復刻了一份 3D 複製品存檔起來。將來有需要時隨時可以透過「RP 逆向工程（Reversed Engineering）」還原複製一份出來。目前這方面的技術多應用於工業製造，筆者認為對重要的古文物，有必要再進行一波「3D 的數位典藏」。

本研究後續的延伸研究如下：

- （一）將 3D 掃描數位拓碑技術應用於碑石尚存的歷史名碑並做其殘損字復原研究：例如《石鼓文》、《九成宮醴泉銘》等等的歷史書法名碑帖，以 3D 掃描數位拓碑結果與該碑之古代知名碑帖版本做交互比對研究。若能協助修復一些泐損字，對碑帖學、文字學研究者及書法臨習者，都將有極大的助益。
- （二）將 3D 掃描數位拓碑技術結合無人機搭載做摩崖石刻的摹拓：無人機測繪在古蹟保存等領域已行之有年，但未曾聽聞運用在巨型摩崖石刻的摹拓應用。此應用若能落實將可以降低真人摹拓之辛勞及危險性。且掃描提取之數位資訊能自由做等比例精準縮放成各種尺寸列印或輸出，以合乎臨帖或其他應用之所需。
- （三）將 3D 掃描數位拓碑技術擴充應用於石碑以外的文字圖形載體，亦即由「金石學」中「石」的領域推廣到「金」的領域。如鐘鼎銘文、甲骨文等不規則立體器物表面上之文字，也能利用 3D 掃描技術做殘損字復原及文物保存、修復等，以提供古文字研究者更多的線索。
- （四）結合人工智慧（AI）、大數據（Big Data）、專家系統（Expert System）等新科技做碑帖的智慧辨識及修復系統。讓修復的邏輯更完整、過程更迅速。

近兩年來高階手機已開始將光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）這樣簡易輕便的 3D 掃描系統內建為標準配備。相信未來 3D 掃描對古文物及碑帖研究的應用和輔助將會更普及、深化且更為簡便。

｜參考書目｜

一、古籍

（宋）林希逸，1983，《考工記解》，《文津閣四庫全書·考工記解·卷上·第89冊》，北京：商務印書館。

二、專書

（美）巫鴻，2016，《時空中的美術：巫鴻中國美術史文編二集》，北京：生活·讀書·新知三聯書店。

仲威，2014，《碑帖鑑定概論》，上海：上海古籍出版社。

吳克敬，2012，《書法的故事》，北京：故宮出版社。

林文睿監修，何培夫主編，1994，《臺灣地區現存碑碣圖誌·嘉義縣市篇》，臺北：國立中央圖書館臺灣分館。

張秋玉編著，2020，《原石拓本比對—韓仁銘》，河南：河南美術出版社。

黃憲之，2018，《張猛龍碑刻拓對勘》，北京：文物出版社。

三、論文

（一）期刊論文

張舜孔，邵慶旺，蔡育林，陳俊宇，2013，〈3D 掃描技術應用於文化資產之適用性討論〉，《文化資產保存學刊》第26期，頁63-78。

（二）碩博士論文

吳禮文，2018，《3D 虛擬修復應用於考古陶質文物—以潮來橋遺址文物為例》（碩士論文，國立雲林科技大學文化資產維護研究所）。

四、網路資源

丹尼斯上傳，〈西安碑林博物館拓碑〉，<https://www.youtube.com/watch?v=y9UA-1dvOXY>（2022年10月27日檢索）。

馬成名，〈關於明朝安國「十鼓齋」收藏宋拓《石鼓文》之我見（上）〉，典藏 ARTouch，<https://artouch.com/art-views/art-history/content-13144.html>（2020年9月17日發表，2022年10月27日檢索）。

Artec Europe，〈Artec3D-Eva〉，<https://cdn.artec3d.com/pdf/Artec3D-Eva.pdf>及〈Artec3D-SpaceSpider〉，<https://cdn.artec3d.com/pdf/Artec3D-SpaceSpider.pdf>（2022年9月28日檢索）。

｜附圖｜



圖 1：〈西安碑林博物館拓碑〉，取自網路視頻截圖，（<https://www.youtube.com/watch?v=y9UA-1dvOXY>）。



圖 2：〈石鼓文〉不同拓印版本的拓印線條品質與泐損處差異，取自《典藏 ARTouch》〈關於明朝安國「十鼓齋」收藏宋拓《石鼓文》之我見（上）〉。

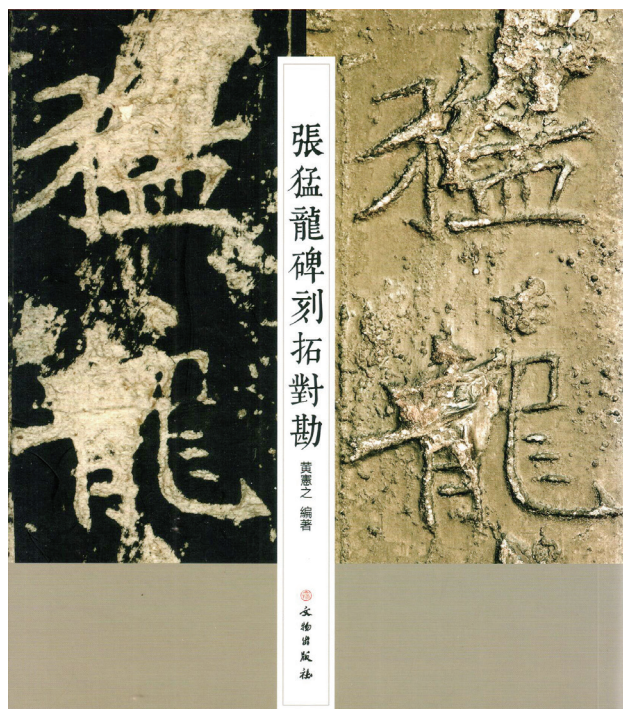


圖 3：〈張猛龍碑〉明拓本與原石照片對勘，取自黃憲之，〈張猛龍碑刻拓對勘〉（北京：文物出版社）封面頁，2018。



圖 4：〈韓仁銘〉新拓本、清乾隆年間拓本與原石照片對勘，取自張秋玉編著，〈原石拓本比對—韓仁銘〉（河南：河南美術出版社）頁 16，2020。



圖 5：嘉義市〈福康安紀功碑〉現況圖，2022。

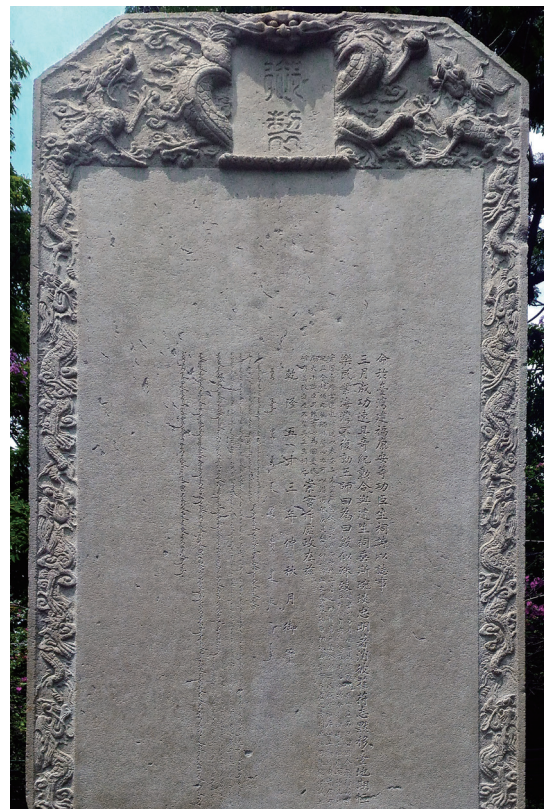


圖 6：晏錦文，嘉義市〈福康安紀功碑〉，1994，何培夫提供。

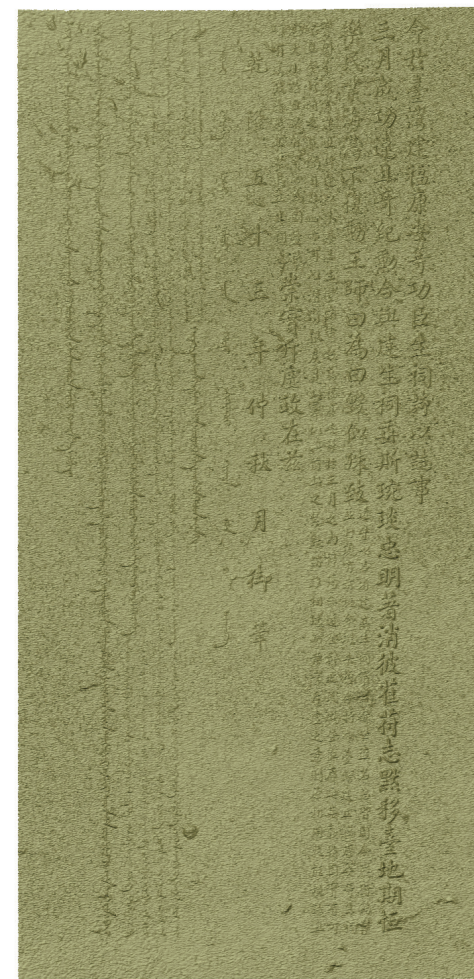


圖 7：嘉義市〈福康安紀功碑〉3D 掃描模型上單一色彩之效果，2022。



圖 8：嘉義市〈福康安紀功碑〉漢文最後一行未泐損的「御」字，3D 掃描前拍攝，2022。



圖 9：嘉義市〈福康安紀功碑〉漢文最後一行泐損的「五」字，3D 掃描前拍攝，2022。