



邱永芳/交通部運輸研究所港灣技術研究中心 主任 賴瑞應/交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員 胡啟文/交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

水工模型試驗係將原型(Prototype)以一定幾何比例縮小成模型(Model)來進行試驗,主要模擬水 中構造物周邊之水流現象,底床質在水中運移之水理特性,相較於數值模擬之方法,水工模型試驗較容易 掌握實際之水理條件、流況與輸砂狀況等物理現象,因此常應用於水利工程規劃設計及河道維護之決策參 考使用。

從事水工模型試驗以了解河道沖淤或海岸漂砂等問題時,需於動床試驗過程中或試驗結束後,量測 模型水理變化或底床地形之變化,傳統之地形量測方式是以經緯儀配合覘標以等之點量測或控制水位做 等深線方式逐點進行量測,隨著科技的進步,開發以光學式砂面測定儀(雷射測距)、超音波砂面測定 儀及連續式地形測定儀(電壓差)之儀器設備用於底床地形量測,而從點的量測進展到線的量測,但尚 皆以逐點或逐線的量測方式間接地構成面的底床高程資料,高程資料雖可取得相當精度之量測結果,但 在平面試驗上多變的地形特性,仍無法詳細得描述,同時相對地費時、費力且需投入相當設備之建置成 本,實需進一步改善量測方式。

有鑑於此,本研究嘗試以一般非量測型之普通數位相機(圖元1,000萬畫素以上),對模型觀測區進行多視點拍攝,並藉由攝影測量軟體獲取三維表面點雲模型,進而生成數值高程模型(Digital Elevation Mode, DEM),因點雲為大量空間點資料的集合,其每點均含有三維座標點資料,具有可完整精準保存目標物不規則表面變化的實際尺寸與影像空間資訊之特性,可直接地構成面的底床高程資料,因此相較於以往之量測方式,具有低成本、高機動性、高精度及微觀記錄之優點,惟以相機拍攝方式存在著光線折射問題及不具有穿透性等限制因素,因此無法量取水面波浪及水深高程資料。由於量測所得皆為數位化資料,如此亦可進行相關之加值應用,如:不同試驗條件下退水後底床的 DEM 資料進行套疊比對、取得任一縱橫剖面資料、等高線圖…等,可直覺地清楚瞭解底床地形之變化及差異值。

基此,本研究將以國道1號中沙大橋之渠槽水工模型試驗為案例,進行近景攝影量測技術及傳統量 測兩種方式之精度分析,探討其可行性。

## 多視立體視覺近景測量技術

多視立體視覺中三維重建技術,以從運動恢復結構(Structure from Motion, SfM)演算法重建場景,透過記錄相機行進路線,並求得相機姿態參數,接著運用三角測量進一步重建三維場景。隨著時代改變,

SfM 演算法場景重建流程,以重建相機的位置與場 景為三維重建之關鍵,藉由多視角所拍攝的多張序列 影像,進行影像匹配,再經由匹配後所得之影像特徵 點,以核線幾何(Epipolar Geometry)<sup>[1]</sup> 關係進行場 景重建,求取相機相對應位置,並探討其與基礎矩陣 (Fundamental Matrix)<sup>[2,3]</sup>之關係,以及基礎矩陣之解 算方法,進而求得場景空間之具體座標進行三維重建。

#### 多視立體視覺演算法理論之簡述

多視立體視覺理論是基於核線幾何所衍伸的方法,所謂核線幾何是指三維空間中的物體,與二維平面影像間相互轉換之空間幾何對應關係,如圖1所示, $O_1$ 和 $O_2$ 分別是兩個相機的投影中心,獲取的影像分別為影像A和B, $O_1$ 和 $O_2$ 連線(基線)與A、B影像的交點 $e_1$ 和 $e_2$ 為核點。假設空間點M至相機投影中心位置由 $O_1$ 到 $O_2$ 的平移向量為t,旋轉矩陣為R,而在兩位置時對應的相機內方位參數分別為 $K_1 \gtrsim K_2$ ,空間點M在A及B影像上的特徵點集合分別為m(x, y)(左影像)及m'(x', y')(右影像)。

假設空間點 M 到像點 m 的轉換矩陣(即投影矩)陣)為 P<sub>1</sub>, 到像點 m'的投影矩陣為 P<sub>2</sub>, 則:

$$m = P_1 M \tag{1}$$

$$m' = P_2 M \tag{2}$$

假設 *O*<sub>1</sub> 為三維空間坐標系的參考原點,且過 *O*<sub>1</sub> 的相機主光軸為 Z 軸,則投影矩陣 *P*<sub>1</sub> 和 *P*<sub>2</sub> 可分別表達 為:

$$P_1 = K_1[I \mid 0]$$
(3)

$$P_2 = K_2[R \mid t] \tag{4}$$

其中 $K_1 \times K_2$ 為相機內方位參數,I為單位矩陣、R為旋轉矩陣及 t 為平移矩陣。

利用場景空間與影像之核線幾何關係,可導出像 點 *m* 和 *m*'之關係為



其中矩陣 F 被稱為基礎矩陣 (Fundamental Matrix), 基礎矩陣為兩張影像間投影核線幾何關係之轉換 (即 影像 A 上的 m 轉換到影像 B 上的 m'),當這兩張影像 所對應的內部參數矩陣分別為  $K_1$  和  $K_2$ ,則它們之間的 本質矩陣 E (Essential Matrix)可定義為:

 $E = K_2^T F K_1 \tag{6}$ 

欲推估兩張影像間的基礎矩陣可由式(5)求得, 其兩張影像中的特徵點集合 m(x, y) 與 m'(x', y') 必滿足 式 (5) 之關係,則每一組特徵點可以產生一個線性方程 式,由於基礎矩陣扣除一個尺度常數之後,還有八個 未知數。而推求基礎矩陣的方法有很多種,最常被使 用的有八點法、七點法、RANSAC(RANdom SAmple Consensus)、LMeds(Least Median squares)等方法。 較為簡單且最廣為使用的為八點法四,即就是在兩張影 像間找到8組特徵點方能解算出基礎矩陣F,再求得本 質矩陣 E,藉由分解本質矩陣 E 可得到旋轉矩陣 R 及 平移向量t,再得到投影矩陣P,及P,,最後可計算出 每一個特徵點所相對應之場景空間點 M 之具體坐標, 藉由上述原理可知欲推算三維空間坐標,旋轉矩陣及 平移矩陣皆可為任意值,即說明不用要求影像拍攝之 位置及方向,以透過多視立體影像中稠密點雲之匹配 方式來獲取大量 DEM 資料。

#### 拍攝距離與測量精度

如圖2所示,由於每一像素之寬度(Pixel Size) 與焦距長(Focal Length),相對於地面解析度(Ground Sample Distance, GSD)與拍攝距離為相似三角形,其



幾何關係可表示為式(7),可按每次工作所需之精度需求,並配合拍攝相機焦距、感光元件規格及解析度,代入式(7)關係式,可決定每次工作所需最大拍攝距離。

 $\frac{Pixel Size}{Focal Length} = \frac{GSD}{拍 \ddagger 距離}$ (7)

## 試驗規劃

## 中沙大橋橋基沖刷對策探討

依據交通部臺灣區國道高速公路局中區工程處(以 下簡稱中工處)委託臺灣大學於102年完成之「國道 1號中沙大橋墩基沖刷治理計畫委託技術服務工作」<sup>[10]</sup> 研究報告成果顯示,目前影響中沙大橋橋基沖刷主要 因素有3點,包括:(1)橋基上游面河中形成沙洲,導 致河道改變,沖刷南北岸之高灘地,造成橋基裸露。 (2)中沙大橋固床保護工護坦消能工長度不足,造成固 床保護工破壞,影響上游橋基安全。(3)受中油管架橋 墩保護工影響,造成下游固床保護工的沖刷破壞,其 上游及兩岸高灘地沖刷狀況如圖3所示,本試驗將探 討以不同橋基保護工對於橋基沖刷之成效。

## 試驗渠槽

渠槽為全長15m、寬0.8m、深0.8m之水平水 槽,如圖4所示,渠槽側壁之材質為強化透明玻璃, 以利於試驗進行時之觀測。渠槽尾端有一小型沉砂池 用以避免試驗砂流入尾水池,後設尾水閘門(tailwater gate),用以控制試驗水深,如圖5所示。

## 橋墩模型

本試驗模型忽略原墩柱之 24 支群樁,僅考慮耐震 補強後之橋梁實際尺寸(如圖 6)以縮尺(1/100)製 作模型,如圖 7 所示;橋墩模型規格如表 1 所示。



圖 3 中沙大橋上游及兩岸高灘地沖刷狀況(資料來源:國道 高速公路局中工處斗南工務段)





圖 4 渠槽斷面圖

圖 5 渠槽尾水控制閘門



圖 6 橋梁相關尺寸



圖 7 試驗橋墩模型照片

表1 試驗橋墩模型規格表

構件	長(CM)	寬(CM)	高(CM)
柱1	4.2	1.6	12
柱 2	上底2.4下底1.9	1.6	9.2
基礎 A	10.5	6.15	2.5
基礎 B	11.8	9.8	1.8
基礎C	5.8	9.8	3.5
樁(直徑 = 1.5 cm)	20		
樁(直徑 = 1.0 cm)	20		

## 渠槽試驗條件

(1) 水流深度

定義為水深(y)和橋墩寬度(a<sub>p</sub>)的比值,當此值 越小,水深改變會影響沖刷深度。當此值越大,則橋 墩迎水面寬度會影響沖刷深度,而與水深較無關係。 Raudkivi和 Ettema(1983)<sup>[6]</sup> 認為 y/a<sub>p</sub>大於 3~4時, 水深變化對沖刷的影響可以忽略,此為深水狀態;反 之則為淺水狀態。

因此,為避免水深影響試驗之沖刷深度,本試驗 之橋墩寬度 (a<sub>p</sub>)為 1.6 cm (模型縮尺採 1/100),試驗水 深 (y)取 8.6 cm, y/a<sub>p</sub>大於 5 可避免水深影響試驗之沖 刷深度。

(2) 底床質粗糙度

當底床質粒徑越大,其抵抗水流沖刷的能力增加,使得最大局部沖刷深度越小。反之,底床質粒徑越小,最大沖刷深度會增加。當中值粒徑 $D_{50}$ 小於 0.6 mm時,在底床會產生沙漣現象,而影響沖刷坑的深度。底床質粗糙度及水流條件會影響臨界速度 $(V_c)$ , Raudkivi和 Ettema (1977)<sup>[5]</sup> 認為當 $a_p / D_{50} > 50$ 時為細顆粒,沖刷深度與深度隨 $a_p / D_{50} 之減少而變小。因此,本試驗中值粒徑<math>D_{50}$ 取 1.2 mm,大於 0.6 mm 且 $a_p / D_{50} > 133$ 。

(3) 底床質均匀性

底床質粒徑分配不均匀時,會在底床質表面形成 護甲層現象(armoring),使得底床質的臨界速度增加,而造成橋墩局部沖刷深度會比底床質粒徑分佈均 匀時小。Raudkivi and Ettema(1977)<sup>[5]</sup>指出在清水沖 刷時,橋墩周圍局部沖刷深度隨底床質均匀性( $\sigma_g$ )增 大而明顯降低,因為在 $\sigma_g$ 大於1.3時會有護甲現象 產生,其會減少沖刷深度。因此,本試驗透過人工篩 選,得到中值粒徑 $d_{50}$ 為1.2 mm,粒徑標準偏差等於 1.3 試驗砂,篩分析結果如圖 8 所示。



(4) 水流流速

橋墩局部沖刷依流速大小的不同可以分為清水沖 刷及濁水沖刷兩種情況,Melville(1999)<sup>[7]</sup>指出在臨 界速度時有最大之沖刷深度,因此本研究將以臨界速 度來進行沖刷試驗。

目前計算臨界流速之公式有很多,參考過去相關 文獻並依試驗室條件評估結果,採用 Melville(1999) <sup>[7]</sup>回歸臨界啟動試驗數據所獲得之公式,如式(8),推 求試驗臨界速度。本研究試驗水深為86 mm,中值粒 徑為1.2 mm,式(8)得到試驗臨界速度為0.4182 m/s, 乘上試驗渠槽寬(0.8 m)及水位高(0.086 m)換算流 量為0.02877 cms。

$$\frac{V_c}{u_c} = 5.75 \log \left( 5.53 \frac{y}{D_{50}} \right)$$
(8)

上式中,

 $u_c = 0.0155 + 0.0125 D_{50}^{1.4}$ ,  $0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm}$  $u_c = 0.0155 D_{50}^{0.5} - 0.065 D_{50}^{-1}$ ,  $1 \text{ mm} < D_{50} < 100 \text{ mm}$ 

其中, $V_c$ 為臨界速度,y為試驗水深, $D_{50}$ 為試驗砂之 中值粒徑, $u_c$ 與 $V_c$ 之單位為m/s。

(5) 水工模型配置位置

速度分佈方程式之基本假設為均匀流,而在流況 尚未完全發展的情況下所量測的資料,並不適用於分 析。故在選定試驗段位置之前,須先確認試驗區段之 流況為完全發展(fully development)流況。

因本研究之試驗水深較低,若以流速剖面決定完 全發展段較為困難,故利用試驗區各段水深來決定完 全發展段。完全發展段選定之範圍是利用平均流速V 與泥沙臨界啟動速度V。之比值,即V/V。為1.0的情況 下量測水深。經試驗觀察結果,本試驗之完全發展區 段位於距入流口約7.0m~9.3m之間,因此本研究設 計距入流口7.5m至9.5m之區段為試驗區,其餘為定 床區,橋墩落墩於距入流口8.5m處,定床區鋪設1.5 公分之砂以保持與試驗段相同之河床糙度,詳如圖9 所示。

(6) 橋墩排列方式

對於各種形狀的橋墩而言(除了圓形橋墩),橋墩 縱軸和水流方向所夾的角度定義為水流攻角。水流攻 角改變,橋墩寬度與水流在垂直方向的投影面積(橋 墩迎水面寬度)會隨之改變,且渦流的形式也會不



圖 9 渠槽試驗段佈設示意圖

同。當水流攻角變大時,局部最大沖刷深度會增加, 本試驗橋墩佈設盡量與水流方向平行,所以不考慮攻 角效應。

## 底床量測設備及誤差探討

本試驗規劃垂直式標尺量測底床沖刷深度(如圖 10所示),並與近景攝影量測結果進行比較,做為精度 探討之基準。

然而,量測設備通常存在著人為、系統及偶然誤差,為消除上述誤差之影響,各點量測時是以增加觀 測次數(多餘觀測)方式求取最或是值,亦即為實測 之沖刷深度,並經實際量測結果進行誤差分析顯示, 藉由垂直式標尺之量測中誤差(Mean Square Error)介 於1.0~1.2 mm 之間。

# 多視立體影像拍攝方式

由於多視立體視覺中三維重建技術,是以 SfM 演算法進行場景重建,利用多視角拍攝的多張序列影像,進行影像匹配解算後,求得場景空間之具體座標,因此照片拍攝方式之規劃,以俯視試驗區並平行



圖 10 垂直式標尺量測設備

移動相機方式進行拍攝,若需取得橋梁基樁裸露之資 訊可再加以側拍方式進行,拍攝軌跡如圖 11 所示,以 達場景三維重建之目的。

## 尺度率定

由於重建後之三維模型內各物件之空間關係僅為 相對座標,需透過真實尺寸之比例尺(物)將影像尺 度轉換為實際尺度,藉此將影像尺寸轉為絕對座標, 以達場景空間具體座標三維重建之目的。

基此,本研究於試驗渠槽內兩側佈設量尺,藉此 量尺來定出實體空間座標系統,做為實體與影像間之 轉換率定,以量得重建後三維模型空間內各物件真實 尺寸。

為探討多視立體視覺近景量測技術之精度,以相 同試驗渠槽進行兩次不同條件沖刷試驗拍攝,以兩側 量尺處佈設控制點,於橋墩沖刷位置佈設檢核點(如 圖 12,控制點編號為C,檢核點編號為T),以驗證利



圖 11 拍攝軌跡示意圖



圖 12 控制點及檢核點位置佈設示意圖

用本研究量測方式之精度及穩定度,並使用前述之假 定座標系統取得真實控制點及檢核點座標位置,藉以 與重建後三維模型內相對應之座標位置進行比對。

#### 相機率定

相機率定步驟為攝影測量中最為關鍵之問題之 一,現今演算法可透過自率定方式,可於移動相機拍 攝影像序列時一併進行相機率定,率定方式為固定焦 距下,對一距離目標進行至少80%以上覆蓋率進行拍 攝,利用大量重疊的方式進行率定參數之求解,簡速 地完成相機率定。

## 成果分析

因光線折射問題及不具有穿透性等限制因素,使 得近景攝影測量方法無法量取水下床底高程資料,需 至試驗完成水退後床底表面無水狀況下進行拍攝,並 與實際測量數據進行比對,藉以探討本研究量測方式 之精度及可行性。

## 點精度分析探討(RMSE)

(1) 試驗組 1

使用相機為 NIKON D300S,拍攝焦距為 26 mm 定 焦鏡頭,拍攝距離約 70 cm,藉由移動相機以多視角拍 攝多張序列影像方式進行三維模型場景重建,相關試 驗數據說明如下。

控制點部分試驗結果如表2所示,檢核點試驗結 果如表3所示,控制點及檢核點均方根誤差(RMSE) 如表4所示。

(2) 試驗組 2

同樣使用相機為NIKON D300S,拍攝焦距為18

表 2 試驗組 1 控制點誤差分析表

Label	實測座標			誤差分析				近景量測座標		
	X	Y	Z	Error(cm)	X error	Y error	Z error	X	Y	Z
C1	100	100	100	0.59922033	-0.018	0.279	0.53	99.982	100.279	100.53
C2	100	110	100	0.26066645	0.083	-0.007	0.247	100.083	109.993	100.247
C3	100	120	100	0.22345917	-0.115	-0.078	0.175	99.885	119.922	100.175
C4	100	130	100	0.1933546	-0.085	-0.169	0.04	99.915	129.831	100.04
C5	100	140	100	0.21416115	-0.144	-0.045	0.152	99.856	139.955	100.152
C6	100	150	100	0.2384848	-0.141	-0.045	0.187	99.859	149.955	100.187
C7	100	160	100	0.21483482	-0.143	-0.064	0.147	99.857	159.936	100.147
C8	100	170	100	0.303661	-0.103	-0.176	0.225	99.897	169.824	100.225
C9	176	100	100	0.45126267	0.147	0.173	-0.39	176.147	100.173	99.61
C10	176	110	100	0.14242893	0.106	0.073	-0.061	176.106	110.073	99,939
C11	176	120	100	0.11196428	0.102	-0.004	-0.046	176.102	119.996	99.954
C12	176	130	100	0.16537533	0.032	-0.135	-0.09	176.032	129.865	99.91
C13	176	140	100	0.17596875	0.015	-0.094	-0.148	176.015	139.906	99.852
C14	176	150	100	0.29814258	0.057	-0.266	0.122	176.057	149.734	100.122
C15	176	160	100	0.40847766	0.047	-0.398	0.079	176.047	159.602	100.079
C16	176	170	100	0.39405076	0.026	-0.342	0.194	176.026	169.658	100.194
C17	176	179.5	100	0.46506021	0.118	-0.386	0.231	176.118	179.114	100.231

表3 試驗組1檢核點誤差分析表

T al al	實測座標		誤差分析				近景量測座標			
Label	X	Y	Z	Error(cm)	X error	Y error	Z error	Х	Y	Z
T1	128.5	126	104.9	0.2889256	-0.25	-0.023	0.143	128.25	125.977	105.043
T2	123.2	126	106.1	0.17369226	0.01	-0.138	-0.105	123.21	125.862	105.995
T3	118	126	104.9	0.19108898	-0.075	0.031	0.173	117.925	126.031	105.073
T4	118	129	103.4	0.54214574	-0.087	-0.087	-0.528	117.913	128.913	102.872
T5	118	132.2	103.4	0.45326703	-0.149	-0.369	0.217	117.851	131.831	103.617
T6	128.5	132.2	102.5	0.68080981	-0.217	-0.378	-0.523	128.283	131.822	101.977
T7	128.5	129	103.1	0.26310644	-0.211	0.04	-0.152	128.289	129.04	102.948
T8	129	132.8	102.3	0.1723978	-0.058	-0.071	-0.146	128.942	132.729	102.154
T9	117.3	132.8	103.3	0.24086511	0.032	0.124	0.204	117.332	132.924	103.504
T10	117.3	137.8	101	0.04370355	-0.026	-0.035	-0.003	117.274	137.765	100.997
T11	117.3	142.8	100.4	0.24123847	0.084	-0.176	0.142	117.384	142.624	100.542
T12	129	142.8	100.8	0.27015921	-0.08	-0.231	0.115	128.92	142.569	100.915
T13	129	137.8	101.2	0.12976132	-0.011	-0.029	-0.126	128.989	137.771	101.074
T14	123	164.5	99.2	0.53251197	0.023	-0.388	0.364	123.023	164.112	99.564
T15	158.8	126	105.4	0.27373893	-0.244	0.094	0.081	158.556	126.094	105.481
T16	153.4	126	105.9	0.17350792	-0.084	-0.093	-0.12	153.316	125.907	105.78
T17	148.3	126	105	0.45444472	-0.05	0.118	0.436	148.25	126.118	105.436
T18	148.3	129	103.5	0.19547378	-0.087	0.16	-0.071	148.213	129.16	103.429
T19	148.3	132.2	102.9	0.12298374	-0.01	-0.092	0.081	148.29	132.108	102.981
T20	158.8	132.2	102.9	0.19815146	-0.152	-0.116	0.052	158.648	132.084	102.952
T21	158.8	129	103.3	0.34219731	-0.175	-0.025	0.293	158.625	128.975	103.593
T22	159.5	132.8	102.9	0.3389233	-0.212	0.255	-0.07	159.288	133.055	102.83
T23	147.5	132.8	103	0.48584051	0.221	0.24	0.36	147.721	133.04	103.36
T24	147.5	138.2	100.7	0.3191567	0.19	-0.256	-0.015	147.69	137.944	100.685
T25	147.5	142.5	100.5	0.26767331	0.188	0.188	-0.031	147.688	142.688	100.469
T26	159.5	142.5	100.6	0.29364775	-0.175	0.23	0.052	159.325	142.73	100.652
T27	159.5	138.2	100.8	0.45461522	-0.139	-0.415	-0.123	159.361	137.785	100.677
T28	153.5	164.5	99	0.24042047	-0.079	-0.219	-0.06	153.421	164.281	98.94

mm 定焦鏡頭,拍攝距離約 60 cm,藉由移動相機以多 視角拍攝多張序列影像方式進行三維模型場景重建, 相關試驗數據說明如下。

控制點部分試驗結果如表 5 所示,檢核點試驗結 果如表 6 所示,控制點及檢核點均方根誤差(RMSE) 如表 7 所示。

(3) 成果比較分析

試驗組1,控制點均方根誤差(RMSE)為0.181 cm、檢核點均方根誤差(RMSE)為0.192 cm,相差

表4 試驗組1控制點及檢核點之 RMSE

	控制	點(cm)		檢核點(cm)			
DX <sub>max</sub>	DYmax	DZmax	D <sub>max</sub>	DX <sub>max</sub>	DYmax	DZmax	D <sub>max</sub>
0.147	0.398	0.53	0.599	0.25	0.415	0.528	0.681
DXmin	$DY_{min}$	DZmin	D <sub>min</sub>	DXmin	$DY_{min}$	$DZ_{min}$	D <sub>min</sub>
0.015	0.004	0.04	0.112	0.01	0.023	0.003	0.044
$\Sigma V x V x$	ΣVyVy	$\Sigma VzVz$	ΣVV	ΣVxVx	ΣVyVy	$\Sigma VzVz$	ΣVV
0.164	0.709	0.805	1.678	0.561	1.142	1.397	3.100
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.098	0.204	0.218	0,181	0.142	0.202	0.223	0,192

表5 試驗組2控制點誤差分析表

Label 實測座標			誤差分析				近景量測座標			
Label	Х	Y	Z	Error(cm)	X error	Y error	Z error	Х	Y	Z
C1	100	100	100	0.65113823	-0.33	0.555	0.084	99.67	100.555	100.084
C2	100	110	100	0.69870308	0.412	0.561	0.061	100.412	110.561	100.061
C3	100	120	100	0.53670849	0.31	0.43	0.084	100.31	120.43	100.084
C4	100	130	100	0.51752681	0.307	0.416	0.023	100.307	130.416	100.023
C5	100	140	100	0.33550708	0.233	0.224	0.09	100.233	140.224	100.09
C6	100	150	100	0.14553007	0.133	0.003	0.059	100.133	150.003	100.059
C7	100	160	100	0.09360556	0.065	-0.044	0.051	100.065	159.956	100.051
C8	100	170	100	0.11011358	0.045	-0.068	0.074	100.045	169.932	100.074
C9	176	100	100	0.5562041	-0.539	0.131	0.041	175.461	100.131	100.041
C10	176	110	100	0.52452741	-0.522	-0.046	0.023	175.478	109.954	100.023
C11	176	120	100	0.5114235	-0.507	-0.061	0.028	175.493	119.939	100.028
C12	176	130	100	0.56990701	-0.569	0.032	0.003	175.431	130.032	100.003
C13	176	140	100	0.46230401	-0.46	0.045	0.01	175.54	140.045	100.01
C14	176	150	100	0.47800418	-0.45	-0.032	0.158	175.55	149.968	100.158
C15	176	160	100	0.43460097	-0.426	-0.029	0.081	175.574	159.971	100.081
C16	176	170	100	0.57429087	-0.365	-0.429	0.112	175.635	169.571	100.112
C17	176	179	100	0.39575118	-0.159	-0.343	0.117	175.841	178.657	100.117

表6 試驗組2檢核點誤差分析表

Label	實測座標			誤差分析				近景量測座標		
Label	X	Y	Z	Error(cm)	X error	Y error	Z error	X	Y	Z
TI	130	126	101	0.5658922	-0.565	-0.015	-0.028	129.435	125.985	100.972
T2	122.8	124	101.5	0.4902499	-0.446	-0.025	-0.202	122.354	123.975	101.298
T3	117.7	124.6	101.5	0.5213799	-0.413	-0.318	0.012	117.287	124.282	101.512
T4	115.4	129	101.4	0.6052718	-0.477	-0.372	-0.021	114.923	128.628	101.379
T5	114.8	132.2	101.8	0.4767767	-0.424	-0.218	-0.004	114.376	131.982	101.796
T6	131.4	132.2	101.4	0.5572378	-0.543	-0.121	-0.032	130,857	132.079	101.368
T7	130.9	129	101	0.5093584	-0.499	0.029	-0.098	130.401	129.029	100.902
T8	131.5	132.8	101.5	0.1514001	-0.127	-0.048	0.067	131.373	132.752	101.567
T9	114.7	132.8	101.9	0.2327638	-0.135	0.175	0.073	114.565	132.975	101.973
T10	115.3	137.8	101.5	0.2274115	-0.156	-0.022	-0.164	115.144	137.778	101.336
T11	115.1	142.8	101.3	0.2049219	-0.188	-0.068	0.045	114.912	142,732	101.345
T12	131.2	142.8	101.3	0.1789246	-0.102	-0.001	0.147	131.098	142,799	101.447
T13	131.2	137.8	101.3	0.2490181	-0.113	0.22	0.029	131.087	138.02	101.329
T14	123	164.5	99.5	0.1754451	-0.1	-0.141	-0.03	122.9	164.359	99.47
T15	158.7	123.7	101.6	0.6357059	-0.561	-0.115	0.276	158.139	123.585	101.876
T16	153.8	123	102.4	0.5770277	-0.538	0.149	-0.146	153.262	123.149	102.254
T17	148.4	124	102.2	0.5049604	-0.472	-0.149	0.1	147.928	123.851	102.3
T18	145.6	129	101.7	0.6001816	-0.592	0.027	0.095	145.008	129.027	101.795
T19	145.1	132.2	101.9	0.5171305	-0.492	0.144	0.068	144.608	132.344	101.968
T20	161.5	132.5	102.1	0.4631566	0.103	-0.449	0.048	161.603	132.051	102.148
T21	161.5	129	101.9	0.1909503	-0.163	-0.098	0.017	161.337	128.902	101.917
T22	161.7	133	102.2	0.2614135	-0.062	-0.253	-0.022	161.638	132.747	102.178
T23	145	132.8	102.1	0.4354986	-0.355	0.205	-0.147	144.645	133.005	101.953
T24	144.9	138.2	101.5	0.3638873	-0.358	-0.043	0.049	144.542	138.157	101.549
T25	144.3	142.8	101.4	0.3302272	-0.319	0.083	-0.02	143.981	142.883	101.38
T26	162.7	143	101.4	0.4427381	-0.4	-0.176	0.071	162.3	142.824	101.471
T27	162.4	138	101.6	0.5807581	-0.488	-0.28	0.144	161.912	137.72	101.744
T28	153.5	164.5	99.4	0.312378	-0.258	-0.17	-0.046	153,242	164.33	99.354

0.01 cm,如表4所示;試驗組2,控制點均方根誤差 (RMSE)為0.277 cm、檢核點均方根誤差(RMSE) 為0.251 cm,相差0.02 cm,如表7所示。

因影像匹配於執行上仍會受到若干條件之限制, 如相鄰影像中比例尺的差異、旋轉、光照反射不均及 影像中的均調區或紋理重複區,均會造成局部區域之 影像匹配失敗、錯誤或不可靠,而直接影響計算之精 度。本研究進行底床拍攝時會因橋墩基礎遮蔽產生陰 影,以及底床砂在影像分佈上較為均調,造成局部區 域像元灰度值差異不大使得點位匹配不可靠,而產生 較大之誤差,因此於兩試驗組控制點及檢核點誤差分 析表中呈現出部分區域量測誤差較大之現象。

綜上所述,運用近景攝影測量於水工模型試驗底 床量測上,雖然有局部誤差較大之現象,但最大誤差 不超過0.7 cm,仍可達mm級精度,且兩試驗組中控 制點與檢核點均方根誤差值差異不大(試驗組1,0.01 cm;試驗組2,0.02 cm),顯示整體具相當之精度及穩 定性。

表7 試驗組2控制點及檢核點之 RMSE

DX <sub>max</sub>	$DY_{max}$	DZ <sub>max</sub>	D <sub>max</sub>	DX <sub>max</sub>	DY <sub>max</sub>	DZmax	D <sub>max</sub>
0.569	0.561	0.158	0.699	0.592	0.449	0.276	0.636
DX <sub>min</sub>	$DY_{min}$	$DZ_{min}$	$D_{min}$	$DX_{min}$	$DY_{min}$	$DZ_{min}$	$D_{min}$
0.045	0.003	0.003	0.094	0.062	0.001	0.004	0.151
ΣVxVx	$\Sigma VyVy$	$\Sigma V z V z$	$\Sigma VV$	$\Sigma V x V x$	ΣVyVy	$\Sigma V z V z$	$\Sigma VV$
2.445	1.367	0.099	3.911	4.048	0.953	0.291	5.293
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.379	0.284	0.076	0.277	0.380	0.184	0.102	0.251

而在兩試驗組別中因選用不同之拍攝距離及焦 距,依式(7)關係式所得之,試驗組1為0.151 mm/ pix,試驗組2為0.181 mm/pix,代表每個圖像所能解 析之精度試驗組1優於試驗組2,因此成果亦顯示均方 根誤差(RMSE)試驗組1小於試驗組2,所得之精度 結果亦較為高。由上述試驗結果可知,整體量測之精 度取決於地面解析度之選擇(如圖2及式7),因此建 議應於試驗前依現場環境與相機條件(感光元件大小 與焦距選用)及所需之精度,進行拍攝距離之規劃。

#### 保護工鋪設方案規劃及試驗結果展示

於前述成果確立近景攝影技術運用於水工模型試 驗底床量測,具相當之精度及穩定性之基礎下,依據 周憲德教授於88年發表於中國土木水利工程學刊之 「蛇籠保護方式對橋墩局部沖刷之影響」181 論文顯示, 蛇籠保護工低於沖刷坑則較無保護之功效,但若高於 試驗底床則會加深最大沖刷深度,故其蛇籠保護工頂 層高程應位於沖刷坑內較適當,因此,本試驗著手規 劃不同保護工鋪設方案(如表8),並利用渠槽水工模 型試驗結果比較不同保護工方案對於橋梁沖刷之保護 深度及範圍,藉由沂景攝影量測技術可快速目完整地 以 DEM 之方式呈現沖刷範圍、深度、橋墩裸露深度及 底床沖淤情形,並可由 DEM 資料製作等高線圖及縱橫 剖面圖,以瞭解底床及特定剖面沖淤之趨勢,如此以 客觀性的量化數據分析不同保護工方案之具體成效, 據以提出相關建議供相關養護管理單位參採,本研究 以不同鋪設方案沖刷後所重建之三維模型、等高線圖 及縱橫剖面圖如表9內容所示。

編號	鋪設方案	最大沖刷深度	沖刷範圍
1	無保護	7.4 cm	26.6 cm
2	一層砂腸袋(試驗底床下 0.5 cm)	5.5 cm	26 cm
3	一層砂腸袋(試驗底床下 1.5 cm)	4.5 cm	23 cm
4	二層直立砂腸袋	5.6 cm	25.1 cm
5	二層斜坡砂腸袋	3.4 cm	27.1 cm
6	三層直立砂腸袋	6.2 cm	26.2 cm
7	三層斜坡砂腸袋	3.2 cm	26.7 cm
8	一層砂腸袋(試驗底床下 1.5 cm)+織物模板	2.2 cm	19.2 cm
	*******************		

#### 表8 不同鋪設方案最大沖刷深度與範圍綜整比較表



表9 不同鋪設方案沖刷後所重建之成果一覽表(下續)

研究發展

表8 不同鋪設方案沖刷後所重建之成果一覽表



## 不同保護工方案試驗結果 DEM 比較

因 DEM 為具有數位化三維座標點資料之特性,而 可藉由套疊比對,以滿足視覺及量化數據分析之方式 瞭解不同保護工方案下對於橋墩沖刷深度及範圍之影 響程度,據以得知該鋪設方案之保護成效。

以鋪設方案3及方案8做為案例說明,將兩方案 套疊後之距離差異分析結果以不同顏色之等位圖呈現 如圖13所示,其是以鋪設方案3做為基準進行比較, 正值代表淤積,負值代表沖刷,為方便辨識,可再將 距離差異分析等位圖與鋪設方案3點雲圖進行再次套 疊如圖14所示,可得知在增加設置織物模板之條件下 橋墩周圍及尾流區域皆呈現淤積之情形,並由等位圖 之顏色及數值可知在增設織物模板後,對於橋墩前沖 刷保護甚為明顯。

另可藉由調整距離差異分析等位圖之顏色分佈,瞭 解最大影響位置及數值,如圖 15 所示(灰色處),在增



圖 13 方案 3 與方案 8 套疊後之距離差異分析結果之等位圖



圖 14 距離差異分析結果等位圖與方案 3 點雲圖套疊

設織物模板後,可造成右邊橋墩前位置淤積約2.3 cm, 而由圖16所示,造成左邊橋橋墩前位置淤積約1.6 cm,如此可以清楚瞭解不同保護工方案之具體成效。

## 結論

本研究對整體點雲的重建精度,依選用之地面解 析度之不同平均可達 2 mm 或 3 mm,該數值與底床量 測設備之人為、系統及偶然誤差(1.0~1.2 mm)亦為 相近,若選用較高畫素數位相機將可提高整體點雲重 建精度至與上述設備量測誤差相同或甚至更佳,因此 運用近景攝影測量為可滿足水工模型試驗於量測上之 精度需求。

透過本研究方法重建所得之 DEM 資料,因其具數位 化之特性,可快速且完整地呈現沖刷範圍、深度、橋墩裸 露深度及底床沖淤情形,並可利用圖層套疊與製作等高 線圖及縱橫剖面圖,一次滿足視覺及量測精度之需求,方



圖 15 增設織物模板後對不同橋墩保護最大影響位置(右橋 墩前,淤積約2.3 cm)



圖 16 增設織物模板後對不同橋墩保護最大影響位置(左橋 墩前,淤積約1.6 cm)

便地以客觀性量化方式分析比較不同保護工方案之具體成 效,據以建議可擇用之保護方案。

本研究雖以近景攝影測量技術為基礎,探討用於水工 模型試驗退水後量測底床之可行性,更可大量應用於其它 工程領域上,將影像資訊量化為工程可使用之三維數值模 型,惟於戶外條件下,光線充足與否及通視程度為構成影 像之主要因素,必須克服夜晚、雨天、霧霾、植披遮蔽… 等自然條件不佳之因素,始能進行有效之攝影測量,相較 於此,沖刷試驗一般皆於室內施作,無上述影響影像構成 之阻礙因素,僅需搭配簡易輔助光源或相機閃光燈來改善 室內照度不足之問題,相對於傳統底床量測設備,擁有精 度高、建置與養護成本低、量測快速及機動性高 … 等優 勢及其多樣性的開發應用潛能,具開發應用之可行性,可 方便輔助操作人員快速地量化並完整記錄試驗現況。

# 參考文獻

- 1. Charles Loop, Zhengyou Zhang (1999), Computing Rectifying Homographies for Stereo Vision, Microsoft Research.
- 2. Olivier D. Faugeras (1992), What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?, Proceedings of European Conference on

Computer Vision.

- 3. Olivier D. Faugeras, Quang-Tuan Luong, Steven Maybank (1992), Camera self-calibration: Theory and experiments, Proceedings of European Conference on Computer Vision.
- 4. Hartley R., Zisserman A. (2004), Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press.
- 5. Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1977), Effects of sediment gradation on clear water scour, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 103, No. 10, pp. 1209-1212.
- 6. Raudkivi, A. J. and Ettema, R. (1983), Clear-Water Scour at Cylindrical Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 713-731.
- 7. Melville, B. W. and Chiew, Y. M. (1999), Time scale for local scour at bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 59-65.
- 8. 周憲德、戴華鍇、陳世清(1999),蛇籠保護方式對橋墩局部沖刷之 影響,中國土木水利工程學刊,第十一卷,第二期,第311-316頁。
- 9. 張庭榮(2008), SIFT 演算法於立體對影像匹配與影像檢索應用之研 究,國立高雄應用科技大學碩士論文。
- 10. 國立臺灣大學(2013),「國道1號中沙大橋墩基沖刷治理計畫委託 技術服務工作」、交通部臺灣區國道高速公路局中區工程處報告。
- 11. 邱永芳、呂良輝、胡啟文(2015),道路邊坡滑動自動攝影監測系統 之研究,交通部運輸研究所報告。
- 12. 賴瑞應、謝明志、胡啟文、曾文傑(2016),跨河橋梁固床工水工模 型試驗-以中沙大橋為例(1/2),交通部運輸研究所報告。

## 10/27 海綿城市技術論壇研討會

地點:集思北科大會議中心 本次活動共 116 人參加,圓滿成功。





呂良正理事長致詞

邱琳濱理事長致詞













何嘉浚教授



周南山教授



## 10/17 106 年能源論壇研討會

地點:台灣電力公司【204 會議室】 本次活動共有 60 人參加,感謝台灣電力公司合辦!



10/26.27 第十屆公共工程非破壞檢測技術研討會

地點:台大應力所 本次研討會共125人參加,感謝非破壞檢測研委員會主辦!



#### 11/2 電源開發與歷史文化研討會



地點:台大應力所 本次活動共 132 位學員參加,活動圓滿成功。 感謝台電公司、台大土木系、日月光文教基金會合辦!