

崩塌地地形量測精度對土方估算影響之研究

吳宗江⁽¹⁾ 馮正一⁽²⁾ 陳文福⁽³⁾

摘要

本文提出使用 3D 雷射掃描技術克服傳統崩塌地地形測量之缺點，利用其快速、高密度、大量取得地表精準 3D 坐標的特性，製作成仿真之崩塌地地形資料，與假設的傳統地面地形測量崩塌地仿真模型，進行高程檢核比較，並以高程資料 $\pm 25\text{cm}$ 為檢核標準。比較結果其相差值大於此標準之點位約為 30%。由此可知傳統地面測量方法受限於崩塌地地形造成實測高程點不足所得到的地形資料，其精度較無法掌握。將此兩種崩塌地地形資料分別以 20m \times 20m 之網格柱形土方公式及 40m \times 40m 之網格柱形土方估算其土方，同一種地形資料不同網格估算之土方差異量約為 3.97%。土方估算的準確度要高，本文建議需高精度之 3D 地形資料及小尺寸之網格柱形土方公式搭配估算。

(關鍵詞：雷射掃描、點雲、仿真之崩塌地地形、高程)

A study on precision of topography measurement for landslides and its influence on volume estimation

Tsung-Chiang Wu⁽¹⁾

Ph.D. student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

Zheng-Yi Feng⁽²⁾

Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

Wen-Fu Chen⁽³⁾

Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

ABSTRACT

This study proposes the use of 3D laser scanning technique to simulate topography of landslide.

-
- (1) 國立中興大學水土保持學系博士生
(2) 國立中興大學水土保持學系副教授 *通訊作者
(3) 國立中興大學水土保持學系教授

The technique can overcome the drawbacks of traditional surveying. This technique it has characteristics of rapid operation and it can collect high density and large amount of point cloud data. The scanned topographical data of landslides are compared with the simulated traditional survey data to study their accuracy. The comparison standard $\pm 25\text{cm}$ was used. The results show that there are about 30% of the topographical data exceeding the standard. Therefore, we can conclude that traditional surveying is less accurate because the data are fewer due to topographical limitations. Comparing the volume of the landslide area calculated by using the grid method of $20\text{m}\times 20\text{m}$ and $40\text{m}\times 40\text{m}$, the difference of the volume calculation is about 3.97%. It is concluded that in order to improve the accuracy of the volume calculation, high accurate topography data should be used with small scale grid.

(**Keyword:** Laser scanning, Point cloud, Simulated landslide topography, Elevation)

前言

崩塌地地形資料為提供崩塌現象相關研究之基礎資料，其可靠度及精度直接影響土方計算、土砂遞移預估、減災工程設計及施工營建成本等。傳統上崩塌地地形資料的取得以地面地形測量、航空攝影測量為主，其中傳統地面地形測量受限於崩塌地險惡的地形因素，往往在實測點位坐標的取得有其限制。航空攝影測量高程精度較差，且對單一的崩塌地而言經濟效益則不符。

影響減災工程設計與施工最重要的基本資料即是測量資料，通常設計者依據測量資料圖面上之等高線進行土方計算、挖填設計，結構體則依據地形變化設計產生等。但崩塌地地形資料的精度良窳，非工程設計人員所能掌握，不良之崩塌地地形資料往往導致變更設計、工法改變；不僅拖延工期，對於營建成本的負擔也相對提高，工程品質易遭受質疑，其影響無法忽略。尤其是崩塌地之地形資料常受限於地表隨時崩塌危險及地形陡峭的因素，若以傳統地形測繪的方式將

因高程資料取樣困難而導致等高線繪製的誤差增加，對後續工作造成不利影響。過去因無法獲得仿真(simulation)之崩塌地地形資料，因此繪製之等高線精度無法準確地探求，對於工程設計及施工的影響也較難量化。本文嘗試以 3D 雷射掃描技術獲得高密度、高精度之地形高程點，產生仿真之等高線做為現況地形，與實測之傳統

地形測量繪製的等高線進行比較分析，探討崩塌地地形資料之精度及對土方估算之影響。

崩塌地形掃描

本文選定一崩塌地，先以 3D 雷射掃描儀進行掃描，獲得 3D 地形點雲資料。經點雲雜訊清除後產生研究用之 3D 地形數位資料，再以不規則三角網法 (Triangulated Irregular Network, 簡稱 TIN) 內插高程組成「仿真地形」。進而模擬空載光達 (airborne Lidar) 地形資料及模擬傳統地形測繪之崩塌地地形資料，再將上述崩塌地地形資料進行分析比較。

(一) 研究對象

以台灣 1999 年集集地震震央附近之九份二山崩場地為研究對象（如圖 1），該地區為地震後之裸露崩塌地形，地表不受植被之影響，所得之崩場地地形資料為實際之地表資料。

（二）使用儀器與原理

本研究使用奧地利 Dibat 3D Laser Geoscanner，掃瞄原理為飛行時間法（Time of flight），由掃瞄儀之二極體發射出脈衝雷射光到物體表面，再接收經由物體表面反射回來的訊號，計算該期間之時間長度，由光速 c 、時間差 Δt 算出掃瞄儀與物體之間的距離 ρ （如 EQ.1 與圖 2 所示）。



圖 1. 研究對象：九份二山

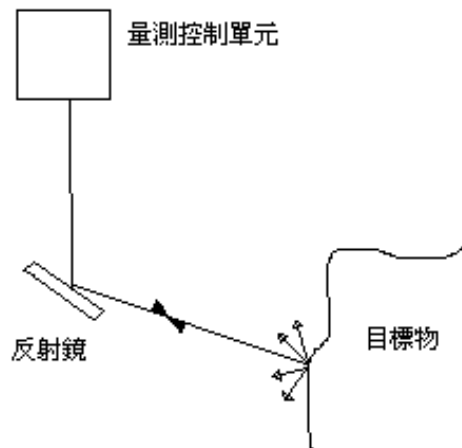


圖 2 . 時間差量測法（飛行時間法）（修改自 Boehler et al.,2001）

$$\rho = \frac{1}{2} c \Delta t \quad \dots\dots\dots (EQ.1)$$

（三）掃瞄作業

首先選定研究崩場地附近適合擺設 3D 雷射掃瞄儀的位置架設儀器。並考慮本儀器

之有效掃瞄距離為 2,500m，且掃瞄距離誤差隨掃瞄距離加長而增加，掃瞄點之密度亦隨距離增加而降低，同時要配合現地地形及掃

瞄區域分布來加以決定。本研究依據上述條件,決定 3D 雷射掃描儀所在位置之考量如下:

1. 距離掃描區域最近為 50 公尺,最遠為 500 公尺。
2. 掃描線密度設定為 0.2gon (註: 400 gon = 360 度; 0.2gon = 0.18 度)。
3. 3D 點雲坐標分布間隔 50cm~500cm。

(四) 初步掃描資料

經過掃描目標區域及位置的框選後即進行掃描工作,本區域掃描面積為 224 公頃,掃描時間為 2 小時 20 分,3D 坐標點雲數量為 80,000 點,呈現的初步成果如圖 3 所示。

崩塌地形掃描資料分析

藉由高密度的 3D 崩塌地地形資料的取得,可以獲得接近真實地形的 3D「仿真地形」模型。本文據此空間資料將分別進行假設模擬,包括空載光達之假設模擬與傳統地形測量之假設模擬。假設的基礎在於我們認為空

載光達是資料數密度比較少的數值地形,所以直接由點雲資料刪減點雲而成,減點的百分比為 10、40、50%三種方式,再以這些不同密度的點雲來模擬「空載光達」地形。而「傳統地形測量」之模擬,則以每十公尺方格網中剔除相鄰點位高程相差一公尺之點位,以模擬傳統地形測量之特性。這些模擬的地形分別再以 10m×10m 網格進行個別的套疊。本研究以內政部地形測量驗收規範合格率 90%為標準,分別以「仿真地形」比對「空載光達模擬」及「地面測量模擬」之地形高程資料合格率。資料分析流程如圖 4。

(一) 「空載光達模擬」崩塌地地形資料

3D 地面掃描點雲資料視為 100%之崩塌地地形資料,即本文所稱之「仿真地形」(約為 80000 點),透過網格均勻減點獲得減點 10% (約為 72000 點)、40% (約為 48000 點) 及 50% (約為 40000 點) 作為「空載光達模擬」地形資料。

(二) 「傳統測量模擬」崩塌地地形資料

同樣將仿真之地面掃描 3D 點雲資料透過

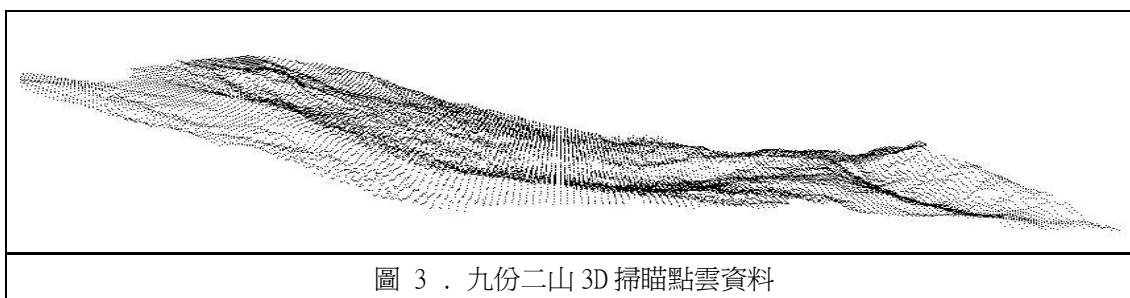


圖 3 . 九份二山 3D 掃描點雲資料

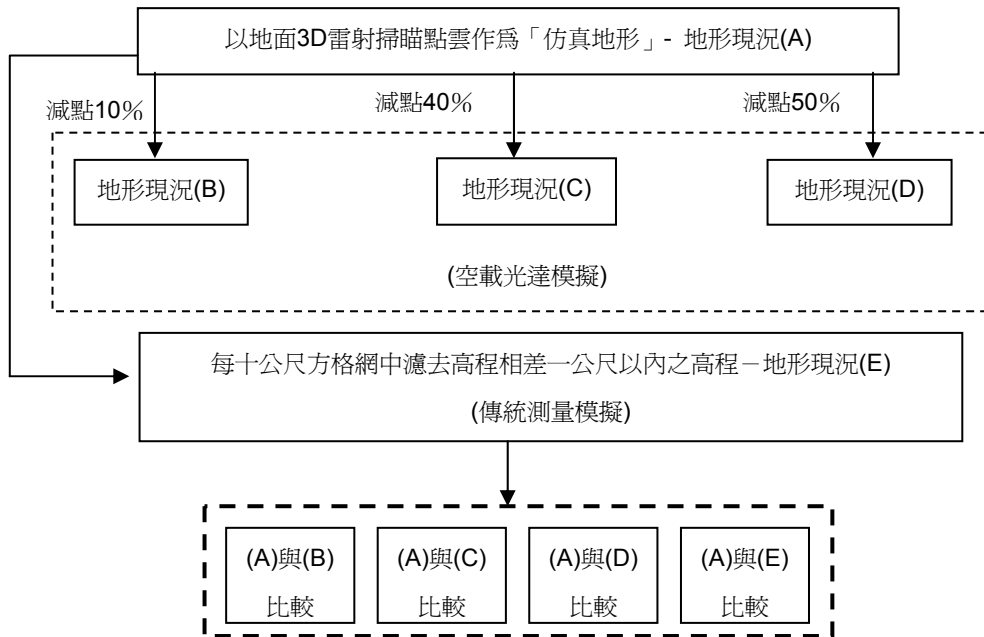


圖 4. 資料分析之流程

相鄰高程點高差一公尺以內即剔除之邏輯運算，模擬出起伏大的地形則 3D 點雲密度高，較平坦的地形則 3D 點雲密度低的傳統地形測繪法則（如圖 5），模擬過程中若為平坦地形則會將高程差一公尺以內的點位濾除（如圖 5 之平坦地），若為地形起伏較大的點位，則需討論點雲密度的影響，當點雲密度高的時候，則可以獲得接近現況地形之點位分布（如圖五之非平坦地(高密度)）；若點雲密度低的時候，則因部份高程起伏位置沒有點雲分布，而導致誤判，使得地形資訊愈易失真（如圖 5 之非平坦地(低密度)），因此必須符合高點雲密度的資料才適用此法。

以 3D 雷射掃描成果精度較高且較均勻，據此將原始 3D 掃描資料以傳統測量法則模擬刪點後，所得點位之精度必定高於實際傳統測量所測的點資料，而且測點數亦遠大於實際傳統測量之點數，因此由 3D 點雲模擬

的傳統測量地形精度應優於實際傳統測量地形。又因實際傳統測量成果未必遵循標準測量程序施測，因此隱含之誤差難以掌握。使用精度較高且均勻的 3D 掃描資料模擬，可免去該無法掌握之誤差，且比較分析的基準也較一致。

（三）「仿真地形」、「空載光達模擬」及「傳統測量模擬」

點雲資料之比較分析依據圖四之資料研究流程，視仿真崩場地地形資料為（A），均勻減點 10%、40% 及 50% 之地形資料分別為（B）、（C）、（D）之「空載光達模擬」，而「傳統測量模擬」資料為（E）。所有樣本先進行不規則三角網（TIN）的運算，獲得內插後之地形資料後，再利用 10m×10m 之網格進行（A）、（B）、（C）、（D）及（E）的套疊，取得同一坐標下之高程資料進行比較分析。比對成果情形如表 1。

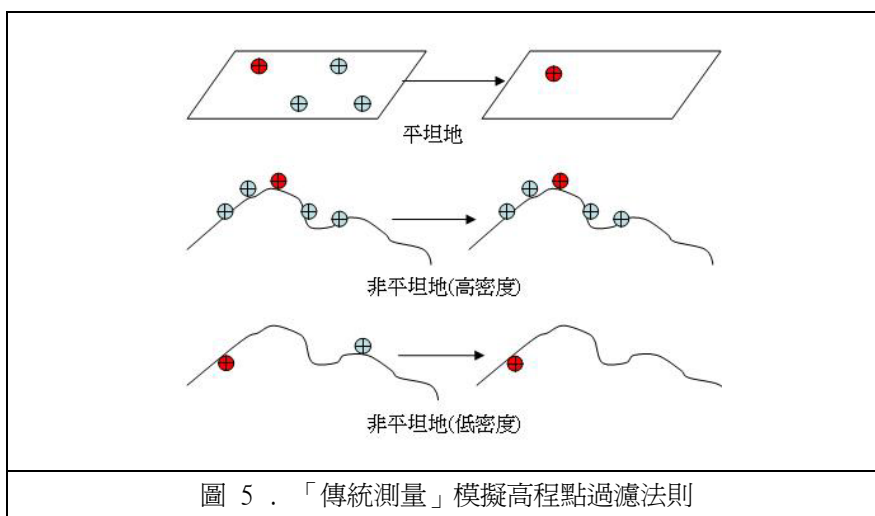


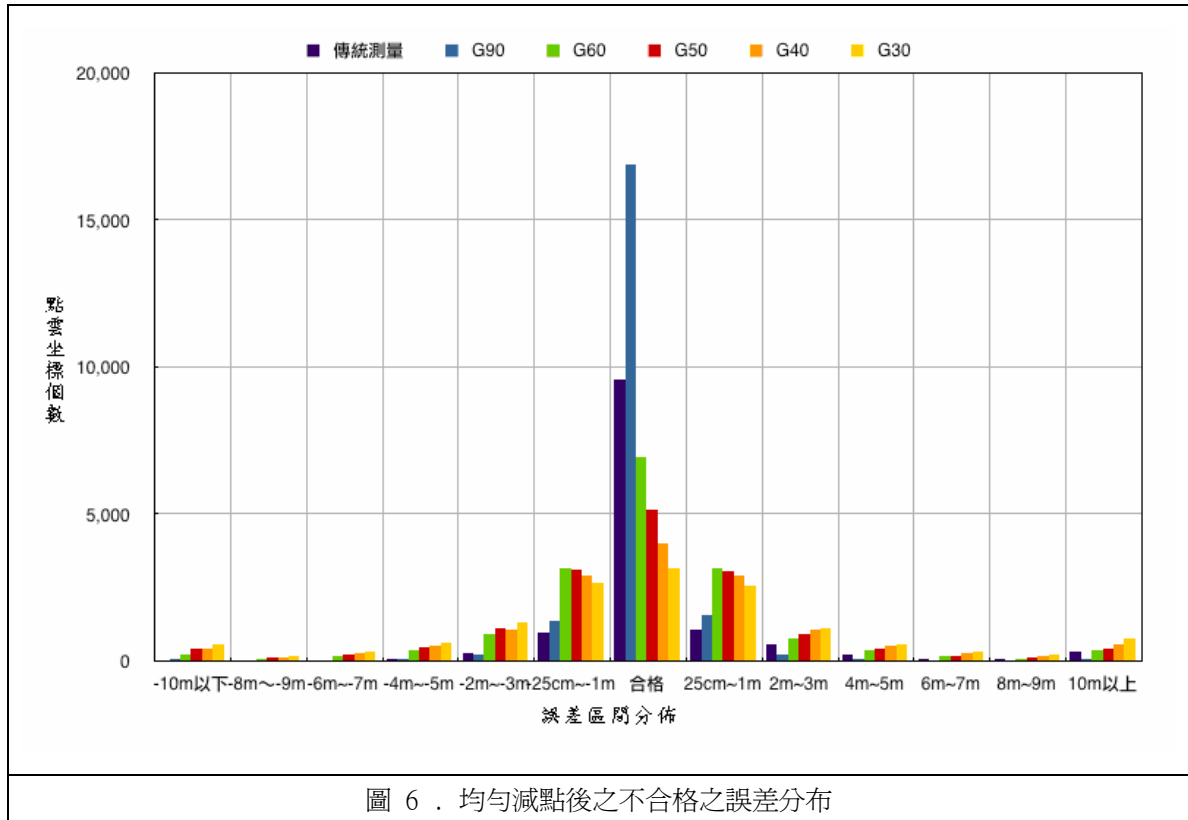
圖 5 . 「傳統測量」模擬高程點過濾法則

表 1 . 合格率比對成果

誤差分析	(A) (B) 比較	(A) (C) 比較	(A) (D) 比較	(A) (E) 比較
檢核點數	22000	22000	22000	22000
小於 25cm	16415	6614	4794	15417
合格率	75%	30%	22%	70%
大於 25cm	5585	15386	17106	6583
不合格率	25%	70%	78%	30%

表 1 之比對成果可以瞭解，均勻減點的數目越多，則所得之地形資料越不精確。因此表一成果可以作為空載光達作業應用於崩塌地時飛行航高設定的參考；即一般飛行高度愈高空載光達的點雲愈疏，精度也愈差，故可作為飛行高度規劃的參考。就 (A) (E) 比較結果可知，沒有足夠的地面實測高程資料時，僅就人為方式判斷高程關鍵點施測的方式，仍不足以滿足實際地形現況，合格率僅 30%。一般高程驗收標準其誤差上限

約訂在±50cm。本研究採取較嚴格之標準，高程驗收標準定為±25cm。所有大於±25cm 之坐標誤差分布如圖 6，可以發現以下幾種情形：
1、每一個樣本的誤差分布均呈常態分布，誤差超過±10m 則可視為「錯誤」。樣本 G90 之合格率為最高，「傳統地形測量模擬」次之，其餘樣本隨減點比例增加誤差亦隨之增加。可見「傳統測量模擬」亦很接近「仿真地形」。



2、小於±1m的誤差區間內，各種模擬之樣本約 90%之檢核誤差均分佈於此區間，尤其以「仿真地形」(A)與「傳統測量模擬」(E)比較後合格率僅 70%的情況下，屬於無房屋區之開闊地形驗收門檻值應介於±25cm~±1m；或是在優於±25cm 的條件下，合格率可適度調降已符合實際測繪作業模式之限制。

地形資料良窳對土方計算之影響

土方計算的資料來源為地形資料，可靠的地形資料產生精確的土方計算值，本文所探討崩場地地形精度便直接影響土方計算精

確度。

從上述中之 (A)「仿真地形」資料作為標準之土方量，(B)、(C)、(D) 及 (E) 之地形資料分別計算出土方量與 (A) 做比較分析，從分析的數據中探討地形資料良窳對土方計算的影響。本文依據 10m×10m 的方格進行各樣本柱形體積的運算，計算之方法類似於馮正一等(2006)之概念，土方差異量之計算如下公式，可獲得如表二之土方計算成果。土方差異量 (m^3) = 「仿真地形」土方量 (m^3) - 均勻減點之地形土方量 (m^3)

表 2. 土方計算成果

樣本	土方量 (m^3)	土方差異量 (m^3)	差異量%
「仿真地形」	454883709.22	0	0%
均勻減點 10%之地形	454583957.96	299751.26	0.07%
均勻減點 20%之地形	453402454.61	1481254.61	0.33%
均勻減點 30%之地形	452895395.29	1988313.93	0.44%
均勻減點 40%之地形	450909157.93	3974551.29	0.87%
均勻減點 50%之地形	450219003.38	4664705.84	1.03%
均勻減點 60%之地形	447885200.83	6998508.39	1.54%
均勻減點 70%之地形	443843368.32	11040340.90	2.43%
均勻減點 80%之地形	438553011.55	16330697.67	3.59%
均勻減點 90%之地形	423105810.74	31777898.48	6.99%

若以目前台灣地區所常用的 DTM 網格，林務單位為 40m×40m、軍方單位為 20m×20m，故本文另以 40m×40m 與 20m×20m 做為體積計算之網格分別計算 (A) 與 (E) 之土方，比較結果如表三。

由表 1 中就 (A) (D) 比較，其高程不合格率高達 78%，但土方計算之結果差異僅 1.03%之結果，可以歸納出減點 50%後，繪製之等高線以內插方式產生，而內插係採取

均勻內插法則，因此原高程起伏大之地形也因此變成平坦的地形，而總體土方量差異以百分比顯示可能不覺得差異量大，就本文 1.03%的土方量為 4,664,705.84 m^3 ，要運送此差異量，以 20 噸的卡車一次平均可運 6 m^3 的標準計算，則需約 777,451 趟的載運，所誤估之營建成本顯然不低，則對於防災工程設計的差異及營建成本也可進行討論。

表 3. 不同網格土方計算成果

體積採用網格尺寸	(A) (m^3)	(E) (m^3)	土方差值 (m^3)	差異量 (%)
20m×20m	463667739.77	463663560.53	4179.24	0.0009%
40m×40m	482049966.90	482011981.60	37985.30	0.0078%
土方差值 (m^3)	18382227.13	18414421.07		
差異值(%)	3.96%	3.97%		

由表 3 之土方計算成果顯示，土方差異量隨著地形高程實測點密度遞減而增大。採用柱型體積公式計算土方量時，土方表面積單元網格愈大則土方量將會被高估。「仿真地形」之土方量估算與模擬傳統測量地形土方量估算若取相同之面積單元網格，土方量估算差異小於 0.01%。但是同一高程點密度之地形資料使用面積單元網格愈大，則土方估算差異量將高達 3.97%。

結論與建議

- (一)「空載光達模擬」之崩塌地高程點，若高程點之密度不足，關鍵之地形高程點遺失資料之比例愈高，地形現況將失真，且經內插後之地形精度隨高程點位密度的降低而降低。「空載光達模擬」之掃描密度至少需達到地面光達掃描高程點分布密度之 90%，兩組資料的分析結果才相當。
- (二)如果取得地形資料為均勻分布的方式（如採用全測站經緯儀均勻取點），地形起伏較大之地形，失真的情況愈嚴重。而「傳統測量模擬」雖然較接近「仿真地形」，但是實務上受限於地形狀況難以達到。
- (三)「傳統測量模擬」之精度若以營建署城鄉局所定之驗收標準（高程最大誤差 25cm），則約 30% 之高程點不符規定。由此可顯示，以傳統測量山坡地形，常因實測高程點取得不若城鄉聚落之地形地貌易於控制，因此精度常遠低於含城鄉聚落地貌之地形。建議對於

山坡地之地形測量成果驗收標準，應另外制定更加合理之標準。

- (四)以本研究案例(九份二山)地形掃描後之點位坐標密度分布達每公頃 320 個點坐標，掃描時間約二小時，則所得之地形資料較模擬傳統測量成果更佳；並且大幅縮短傳統測量外業工作時間。
- (五)面積單元網格之選擇與高程點密度有絕對的關係，高程點密度愈大，可製作小面積網格，土方估算之結果較準確。高程點密度小，僅能製作大面積網格，土方估算之結果愈不準確。
- (六)若土方估算以內政部之 40m×40m 之 DTM 數值資料作為計算基礎，經本文研究可推論，其土方計算成果之精度可能不佳。
- (七)3D 雷射掃描掃描地形依工程設計需求及目的可進行部份加密掃描的作業方式，滿足實際效益。因此精準之地形資料可提高相關後續研究成果之可靠度，使工程設計較適切，可降低營建成本。

參考文獻

1. Boehler, W., G.Heinz, A. Marbs, 2001. The Potential of Non-contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording, Proceedings of CIPA International Symposium, Potsdam, Germany.

水土保持學報 39 (1) : 63-72 (2007)

Journal of Soil and Water Conservation , 39 (1) : 63-72 (2007)

2. 馮正一、梁家齊、吳宗江 (2006)「邊坡變遷三維測量與穩定性分析」，水土保持學報，第 38 卷第 2 期，pp.117~128。

95 年 10 月 25 日 收稿

95 年 11 月 20 日 修改

95 年 11 月 28 日 接受