

面變形自動量測及分析系統之研究

An Automated System for Surface Variation Measurement

計畫編號：NSC 87-2211-E009-008

執行期限：86 年 8 月 1 日至 87 年 7 月 31 日

主持人：史天元 國立交通大學土木系

摘 要

變形測量之實行，常以眾多點位為面之表現。亦即，在不同時段量測變形體上之特定點的座標，由而達成變形變化之資料蒐集。為提供較佳的辨識效果，這些特定點通常為佈標點。由於先後時段量測時之參考座標系，可能有所變動；同時，佈標亦有難於進行之時刻。故本研究乃使用不需反射稜鏡即可進行測量之伺服式全測儀為數據量取工具，自行發展出自動量測系統，採用面與面之比較，來達成分析之效果。

Abstract

Surface is generally represented as a group of points. For the surface deformation monitoring process, the positions of a group of selected points are surveyed at two or several time instances. Then, the displacements and velocities could be computed. Most frequently, these points are signalized and remain fixed. However, the signalization process is not always easy, and the potential change of the reference system can cause difficulties in the deformation analysis. In this study, a deformation analysis system is developed. This system includes a total station based automated surface surveying module, and the analysis module.

一、前言

就目前測量類儀器而言，全測儀為較

普遍且適用之變形監測儀器。本研究之自動量測系統作業乃使用 Leica TM1100 伺服式電子經緯儀配合 WILD DIOR3002S 電子測距儀，藉由程式語言由個人電腦控制進行量測。量測過程以自然物表面反射進行測距，而不採用反射稜鏡或貼紙，作業時採不佈標之方式進行。

本研究針對系統之各項穩定度進行一系列之相關測試，並完成系統量測作業之評估。研究中並探討了四個面變形分析方法，分別為（一）反捲積法；（二）最大相關法；（三）點對點相似轉換；（四）坡度條件式相似轉換。

二、自動量測系統之開發

Leica TM1100 為一部 1" 讀之經緯儀，其角度之精度為 $\pm 3''$ ，具備伺服馬達之操控功能。DIOR3002S 具備在 350m 以內不需佈設反射器即可進行距離量測之功能，該操作模式距離觀測標準誤差為 $\pm 5-10\text{mm}$ 。進行自動量測系統觀測時，為採等角度方式進行網格點位之觀測。雖為規則取樣，但可能遺漏部份重要特徵點，再加上部份取樣點會因反射訊號太弱而無法獲得觀測值，造成觀測點位的取樣不足及分佈不勻。因此，必要時可另作特定點位之補充觀測。為瞭解所開發之自動量測系統的使用條件及可期精度，本研究針對系統之各項穩定度進行一系列之相關測試。各測試項目之方法及結果說明如下。

1. 固定點長時段讀數穩定度測試

測試時使儀器立於定點保持不動，而

後針對一特定目標每隔 30 分鐘讀數一次（不重新照準，但是測距則包含量測過程）。此項測試共記錄 80 筆數據，經計算得水平角之標準偏差 σ_A 為 0.499"，天頂距之標準偏差 σ_Z 為 3.987"，斜距之標準偏差 σ_d 為 1.131 mm。

2. 固定點短時間讀數穩定度測試

如同上一項測試，但是於每筆觀測完成後立即進行下一筆觀測，以期能求得儀器於短時間內固定點重複觀測時讀數之穩定度。此次測試共記錄 50 筆數據，經計算得水平角之標準偏差 σ_A 為 0.198"，天頂距之標準偏差 σ_Z 為 0.463"，斜距之標準偏差 σ_d 為 1.107 mm。

由 1、2 兩項測試之結果可發現，天頂距的標準偏差明顯較水平角標準偏差為大，經分析其主要的原由和儀器本身構造及 DIOR3002S 外掛於電子經緯儀上有關。另由本項測試亦可計算於標準觀測模式（Standard mode）下，若不考慮儀器移動至照準觀測點的時間，則每次儀器將耗費約 4.68 秒來進行距離的獲取（在能順利測得距離之情況下始成立）。

3. 儀器轉至固定角度之穩定度測試

將所指定之角度值與儀器實際所轉至之角度值相減後，即可計算得水平角及天頂距兩組差值的標準偏差。進行測試時，DIOR3002S 仍加掛於電子經緯儀上方，但不測距。測試結果共記錄 50 筆數據，經計算得水平角之標準偏差 σ_A 為 3.465"，天頂距之標準偏差為 σ_Z 為 3.635"。由結果可知，每次進行儀器自動照準觀測時，在角度方面大約會有 3-4" 的誤差產生。

與前項測試比較可發現，本項測試較前項測試多了一儀器驅動過程，亦即多存在一項驅動誤差於結果中。由計算可得水平及垂直方向驅動誤差分別為 3.459" 及 3.605"，兩方向之驅動誤差大致是相同的。

4. 儀器驅動及讀數所需時間之穩定度測試

本項測試所指的「觀測時間」包含儀器之轉動時間及測距時間。計算結果得儀器在水平方向移動觀測時，其觀測時間之標準偏差 σ_{tA} 為 0.135 秒；而在垂直方向移動觀測時，觀測時間之標準偏差 σ_{tZ} 為 0.049 秒，此項結果為全測儀在可順利測得距離之情況下所計算而得。

5. 儀器旋轉所需耗費時間推求

由於全測儀旋轉不同之角度需時不同，因此藉由實驗可推求出旋轉角度量與耗費時間兩者間之相關函數式。本研究僅針對水平角驅動系統進行測試，計算結果，得旋轉角度 $A(^{\circ})$ 與耗費時間 $T(\text{秒})$ 之關係式為：

$$T = \sqrt{\frac{A}{5.735}} \quad A < 60^{\circ} \text{ 時}$$
$$T = 0.027A + 1.611 \quad A > 60^{\circ} \text{ 時}$$

6. 最大監測範圍評估

設觀測之變形範圍為一矩形，寬為 W 、高為 L ，儀器置於變形面之正前方的地上（測站高與變形面之底端同高），儀器高為 1.5m，而儀器之橫軸方向為 X 軸方向，正對變形面之方向為 Y 軸方向。在上述假設條件下，可推得 TM1100 及 DIOR3002S 自動量測系統進行面變形監測時需滿足下述四項條件：

$$d \geq 0.8 \text{ m}$$
$$\sqrt{d^2 + (L - 1.5)^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2} \leq 350 \text{ m}$$
$$\tan^{-1}\left(\frac{2d}{W}\right) > 15^{\circ}$$
$$\tan^{-1}\left(\frac{L - 1.5}{d}\right) < 75^{\circ}$$

式中 d 為儀器與觀測面之垂直距離， W 與 L 之單位為公尺(m)。經計算，在此條件下，最大之監測範圍為寬及高均為 280m 之目標物，此時儀器與目標物之垂直距離可為 70m。

7. 變形速度評估

由前一節系統之穩定度測試中得標準

觀測模式下每筆距離觀測時間約 4.68 秒，配合儀器在每筆觀測間之旋轉時間需 T 秒，可計算出當觀測之目標物涵蓋水平角方向 a° 、垂直角方向 z° 時，若觀測了 C 行及 L 列，則總共需費時（單位為秒）

$$T_{all} = 4.68$$

$$T_{all} = \left(\frac{a}{C-1} + \frac{z}{L-1} \right) \cdot T + 4.68C \cdot L, C \neq 1 \text{ and } L \neq 1$$

由時間與變形量可得變形速度。

三、面變形分析

變形體之變形量之可藉由兩次量測之量直接比較獲取。因此，由佈標點所進行之變形測量可直接求得三向座標系中各點位變形之方向及大小。不佈標之方式則需先行進行內插，使兩次量測所得之成果，能有相同之平面座標，以便比較。本研究，DEM 網格之建立採用 Surfer 中之 Linear TIN 及 ACM Algorithm 624 (Renka, 1984) 兩內插方法。兩法所採用之資料結構均為 TIN，Linear TIN 採線性內插，ACM Algorithm 624 則採 C^1 Spline 內插法。

3-1 頻率域分析參考座標系平移

1. 反捲積法

根據 Arabelos (1994)，若完全相同之網格間存在一平移關係，則 $f(x, y)$ 之圖形會有兩個較大的尖峰，但其值只有無平移狀況之一半，而其它區域亦出現許多小的尖峰。本方法經多次實驗，發覺無論是否存在平移，濾波函數均無法反應平移現象，故以理論推導證明之，發現當兩相同 DEM 間存在一平移關係時，其濾波函數圖形仍和無平移時相同，為一脈衝函數型態，而非兩尖峰型態，故 Arabelos (1994) 所提出之反捲積方法經證明似乎有誤。

2. 最大相關法

若令 $g(x, y)$ 與 $h(x, y)$ 分別代表先後兩時段所測得之格網， $G(u, v)$ 與 $H(u, v)$ 為其頻率域之對應函數，則

$$F(u, v) = H(u, v)G(u, v)^*$$

經過逆轉換可求得 $f(x, y)$ ，其為 $g(x, y)$ 與 $h(x, y)$ 之相關係數。

此法乃在藉由最大相關係數所在之點位座標，可求出兩 DEM 間之位移量，故稱其為最大相關法。根據研究，由兩完全相同之網格所求得之 $f(x, y)$ 其圖形在座標 $f(1, 1)$ 處會有一較高之尖峰存在。但若完全相同之網格間存在一平移關係，則此時較高之尖峰會位在其位移量之點位上，而非在 $f(1, 1)$ 上。而若因量測精度而產生全面性雜訊時， $f(x, y)$ 所產生之反應僅會使 $f(x, y)$ 圖中之小尖峰量變大，並不會對整體結果造成改變。

但是若 DEM 所展示之地形面為一單調無特徵，或具有週期性之規律結構，則雖然兩 DEM 間存在相對之大位移，則仍可能無法順利求得正確之結果，故本法較適用於 DEM 中有明顯特徵者。經實驗分析，存在一平移關係的兩相同 DEM 間整體相關係數若低於 0.6，則此法較可順利求出其間之位移量。

3-2 面相似轉換原理

1. 點對點相似轉換

三度空間基準轉換可以七參數相似轉換描述。藉由最小二乘法，可求解七參數值。配合 Pope (1976) 的 Tau 測試粗差估驗可區分變形之點位與未變形者。

2. 坡度條件式相似轉換

作業時若無設置控制點，藉由面與面間的匹配，將可順利求得變形體之變形量 (Pilgrim, 1988)。

四、實驗成果分析

夫布爾溪河谷施測作業共進行兩次，其作業時間分別為民國 86 年 10 月 10 日及民國 87 年 2 月 13 日。現地以 GPS (Trimble 4000SSE) 測設基線站二點。在第一次作業時，全測儀架設在 P2 點上，照準 P1 為基線方向，觀測範圍涵蓋水平方向 108.5° ，垂直方向 26.9° 。第二次作業則架設在 P1 點，照準 P2 為基線方向，涵蓋水平方向

90.0°，垂直方向 25.9°。比對時取 N 方向 2706174m~2706248m、E 方向 289224m~289296m 之範圍（取樣間隔為 2m），將兩筆資料分別進行內插（Linear TIN）。兩筆資料各對應點高程差值經統計平均高程差值為 1.063m，絕對平均誤差為 2.051m，相關係數為 0.991，標準偏差為 2.127m。

1. 面變形分析

a. 最大相關法

經計算得 $f(x, y)$ 函數最大值出現在 $f(0, 0)$ 之位置，顯現無平移量。

b. 點對點相似轉換

由於進行夫布爾溪河谷觀測時，除基線點外，並無設立其它控制點，因此，此處採人工方式於較明顯地形特徵處直接進行控制點選點。共選取了 5 點，經計算得七參數值及其標準偏差量。轉換結果並不理想，此與選點有關。改善方式為在施測時加測數個佈標控制點或明顯地物點。

c. 坡度條件式相似轉換

坡度條件式相似轉換乃採兩 DEM 匹配之方式進行，在不需控制點之條件下，即可求得兩 DEM 間的七個轉換參數。在研究期間，並無法順利求得各筆觀測資料間之轉換參數值，原因尚在探究中。但因本法之計算模式類似於最大相關法，故若 DEM 所展示之地形面為一單調無特徵，或具有週期性之規律結構者，將可能導致計算失敗。

五、 結論

1. 本研究所開發之全測儀自動量測系統，為採等角度間隔觀測。由實例證明採不佈標法進行變形監測是可行的，且能降低人力資源的需求並加速測量作業的進行。另由 DEM 高程差值比對及相關係數等各項統計指標結果，均顯示使用全測儀自動量測系統所得結果相當穩定。
2. 由實驗測試可得此套量測系統對一般

河谷地（由植被及裸露沙岩等所組成）之施測成功率僅約為 80%。這個結果將造成觀測點位分佈的不平均，導致內插結果的不準確性增高。資料刪除之原因，據判斷除少數因訊號打向空中而無法反射外，其最主要之原因和鏡面反射、目標物反射係數較低及距離太遠有關。鏡面反射及目標物反射係數較低兩問題，在外業作業時較無法受人為來控制，但距離問題則可由縮短觀測距離來解決。觀測環境狀況亦影響到觀測距離的遠近，如能在夜晚進行觀測，則觀測距離可加長。

3. 本研究中使用反捲積法、最大相關法、點對點相似轉換及坡度條件式相似轉換四種變形分析方法。經理論推導證明反捲積法似乎有誤，而其它三種方法亦有其特定之限制。採點對點相似轉換必須藉由相同之控制點方可進行，至於使用最大相關法及坡度條件式相似轉換時，若兩 DEM 所展示之地形面為一單調無特徵，或具有週期性之規律結構者，將導致方法失敗。

參考文獻

- Arabelos, D., (1994), Validation of ETOPO5U in the Hellenic Area, Bulletin Geodesique, 68: 88-99.
- Pilgrim, L., (1988), Detection of change in three-dimensional models with time – the medical application. Biostereo-metrics '88, proc. of SPIE 1030: 130-137.
- Pope, AJ, (1976), The statistics of residual and the detection of outliers. NOAA Tech. 65, NGS 1, U.S. Department of Commerce, National Geodetic Survey, Rockville, Md.
- Renka, R., (1984), ALGORITHM 624: Triangulation and Interpolation at Arbitrarily Distributed Points in the Plane, ACM Transaction on Mathematical Software, 10: (4) 440-442.