


第二章 三維雷射掃瞄系統

三維雷射掃瞄儀是在儀器內部的座標系之下，利用主動打出的雷射光對目標物的表面進行掃瞄，量測出儀器到目標物的距離與角度，並藉此定出目標物與測站相對的三維座標。在本章節中除了對三維雷射掃瞄的構造及原理作一敘述之外，同時也將比較各種不同類型的三維雷射掃瞄儀，並對多測站點雲資料的疊合以及與地面座標的轉換進行說明。

2-1 三維雷射掃瞄儀構造



三維雷射掃瞄儀的主要構造是由雷射測距儀與兩塊分別為水平方向以及垂直方向等角速度旋轉的反射稜鏡所組成，如圖 2-1 所示。掃瞄時雷射光打出，經由兩片稜鏡的反射可控制掃瞄的水平角和垂直角，並藉由被目標物反射回來的雷射光量測與物體的斜距和角度，以推求掃瞄點與測站的相對三維座標。由圖 2-1 可以看出，儀器內部的座標系原點並不在雷射測距儀與反射稜鏡的連線中心，因此必定有一個系統的誤差量存在，必須經過嚴密的率定才能得此平移量，並加以改正。

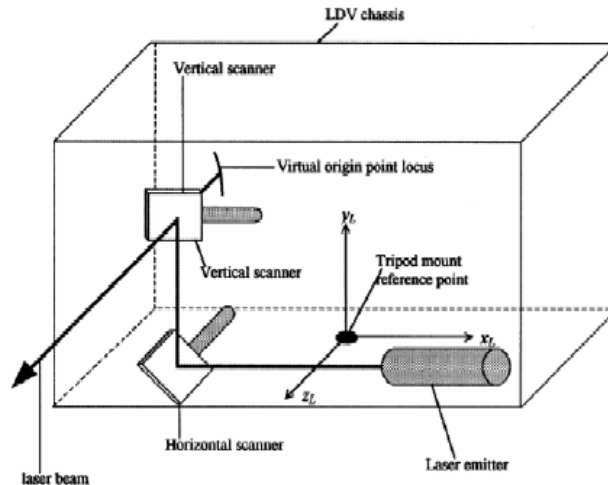


圖 2-1 三維雷射掃瞄儀的主要構造 (Stafne et al., 2000)

2-2 雷射測距原理

2-2-1 脈衝式與連續波式



三維雷射掃瞄儀是利用雷射光的發射與接收反射回來訊號的時間差及相位差來測量儀器與掃瞄點之間的距離和角度，而依雷射材料可分為固體雷射和氣體雷射，依雷射發射種類又可分為脈衝式 (pulse) 雷射與連續波式 (continuous wave) 雷射；氣體雷射常搭配連續波式雷射而用於全測站，固體雷射則通常搭配脈衝式雷射而用於雷射掃瞄儀 (張明政，2004)。脈衝式雷射的成本較連續波式雷射低，且取得較容易，本研究所使用的 Mensi GS200 即是使用脈衝式固態雷射。

脈衝式雷射測距和連續波式雷射測距在光波訊號的形式和計算

公式上亦稍有不同，圖 2-2 即為脈衝式和連續波式的波形和其測距的計算公式。從計算公式中可以發現，雖然公式不盡相同，但是其原理都是根據雷射光發射與接收的時間差來計算出距離，將往返時間除以二，即可得到雷射光單向所需的時間，再把時間乘上光速即可求得測站與掃描點之間的距離。

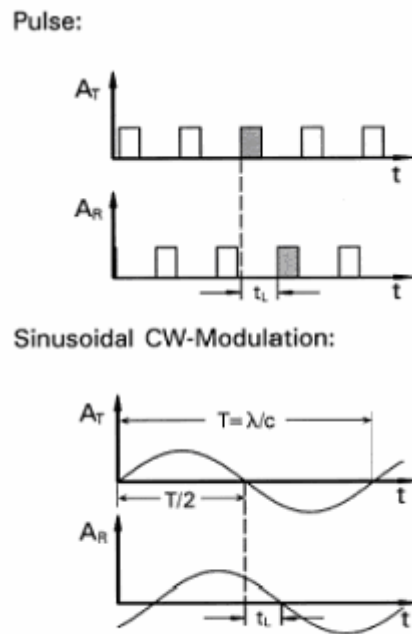


圖 2-2 脈衝式雷射測距和連續波式雷射測距的光波形式 (Wehr and Lohr, 1999)

首先看兩者的距離解析度，可由式 2-1 和式 2-2 來比較之間的差異。脈衝式測距僅受時間解析度 Δt_L 影響，而連續波式測距則跟相位解析度 $\Delta \phi$ 和頻率 f 有關。

$$\text{Pulse laser: } \Delta R = \frac{1}{2} c \Delta t_L \quad (2-1)$$

$$\text{CW laser : } \Delta R = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \Delta\phi \quad (2-2)$$

接著我們可以比較兩者的最大測距距離 (Maximum Range)，從式 2-3 與式 2-4 可以看出，脈衝式系統的最大測距距離受限於儀器所能辨別的最大時間差 $t_{L\max}$ ，但一般來說 $t_{L\max}$ 均夠大，而實際影響最大的因素是雷射光在空氣中傳遞時能量的損耗與地物反射面特性，導致回傳的訊號太弱而無法測距。在連續波式中當 $\phi=360^\circ$ 時其最大測距距離只有波長的一半，因此連續波式系統中常會使用多重頻率的雷射光，以較長頻率來達到較長的測距距離，以較短的頻率達到較小的測距解析力。(賴志凱，2004)

$$\text{Pulse laser : } R_{\max} = \frac{1}{2} c t_{L\max} \quad (2-3)$$

$$\text{CW laser : } R_{\max} = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \Delta\phi = \frac{1}{4\pi} \lambda \phi = \frac{\lambda_{\text{long}}}{2} \quad (2-4)$$

脈衝式的測距精度與產生脈衝的時間和訊雜比有關，而在連續波式中則與光波波長和訊雜比有關。可由式 2-5 和式 2-6 中看出兩者的不同。(賴志凱，2004)

$$\text{Pulse laser : } \sigma_R \sim \frac{c}{2} t_{\text{rise}} \frac{1}{\sqrt{S/N}} \quad (2-5)$$

$$\text{CW laser : } \sigma_R = \frac{\lambda_{\text{short}}}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{S/N}} \quad (2-6)$$

2-2-2 時間差量測法與三角幾何法

Boehler(2002)依照儀器本身設計原理的不同，將三維雷射掃瞄儀的測距分為時間差量測法（Time-of-Flight）和三角幾何法（Triangulation）。

時間差量測法是藉由雷射掃瞄儀本身發出的脈衝式雷射光至目標物的表面，並接收其反射回來的訊號，依式 2-7 的公式算出兩者間的距離。圖 2-3 是時間差量測法的示意圖。採用時間差量測法可測量較長的距離，但在近距離時精度較差，誤差隨距離增加而增加。本研究所使用的 Mansi GS200 也是屬於時間差量測法。

$$\rho = \frac{1}{2} c \Delta t$$

(2-7)

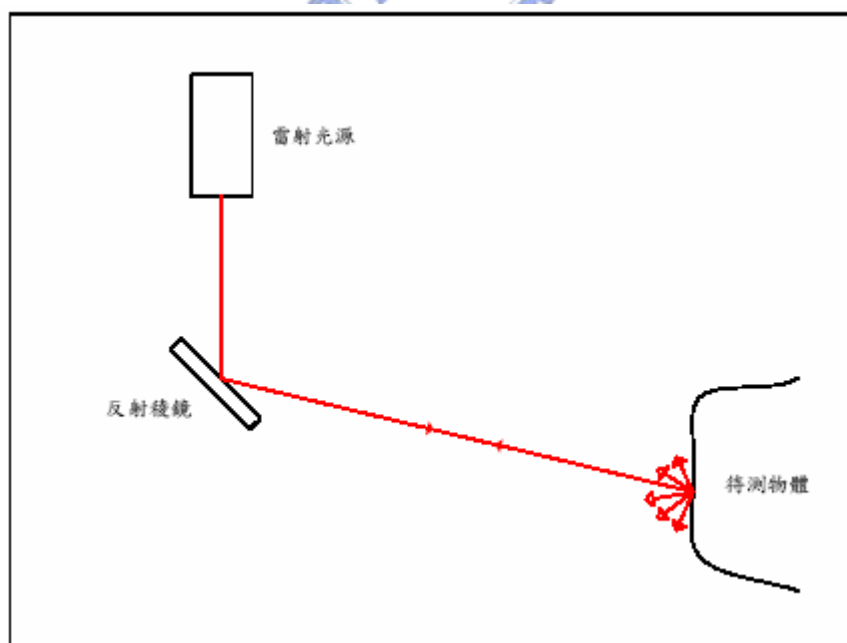


圖 2-3 時間差量測法 (Boehler, 2001; 黃偉城, 2004)

三角幾何法是利用三角形的幾何關係求得掃瞄儀和目標物表面

的距離。由儀器發射雷射光到目標物的表面，記錄入射光和反射光之間的夾角，雷射光源和接收器之間為已經率定過的基線長，利用三角幾何關係可推求儀器到目標物之間的距離。本方法可分為單相機三角幾何法與雙相機三角幾何法。單相機三角幾何法是利用雷射光源發射雷射光撞擊待測物體表面同時，由掃描儀另一側之數位相機同時攝影該撞擊點，因為雷射光源與數位相機間的位置為已知，藉式2-8的計算待測物體之位置，如圖2-4所示。雙相機三角幾何法則是利用雷射光源發射雷射光撞擊待測物體表面同時，由掃描儀兩側之數位相機同時攝影該撞擊點，因為兩數位相機間的位置為已知基線，藉式2-9的計算待測物體之位置，如圖2-5所示。

$$\rho = \frac{l}{\cos \lambda} \quad (2-8)$$

其中 ρ 為距離， l 為反射稜鏡到鏡頭的基線， λ 為鏡頭和基線的夾角

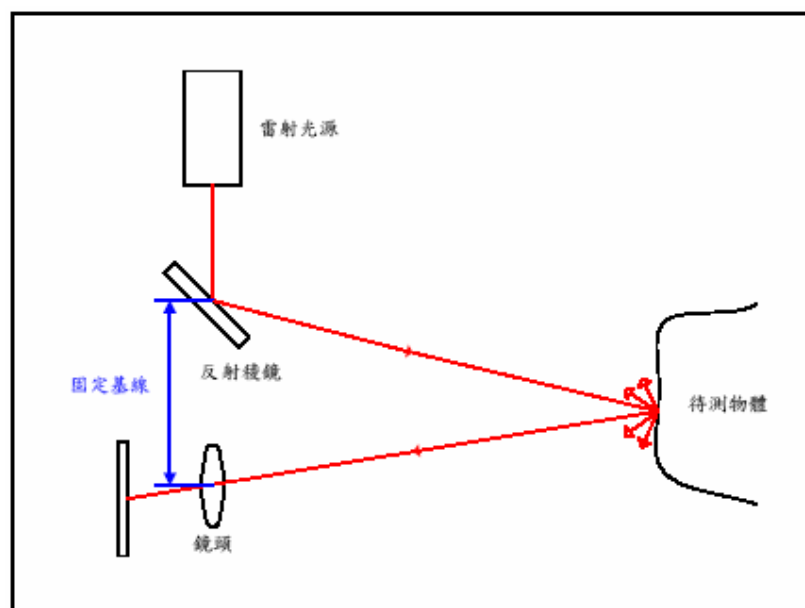


圖 2-4 單相機三角幾何法 (Boehler, 2001; 黃偉城, 2004)

$$\rho = l_1 \tan \lambda_1 = l_2 \tan \lambda_2 \quad l = l_1 + l_2 \quad (2-9)$$

其中 ρ 為距離， l 為兩鏡頭的基線， λ_1 、 λ_2 為鏡頭和基線的夾角

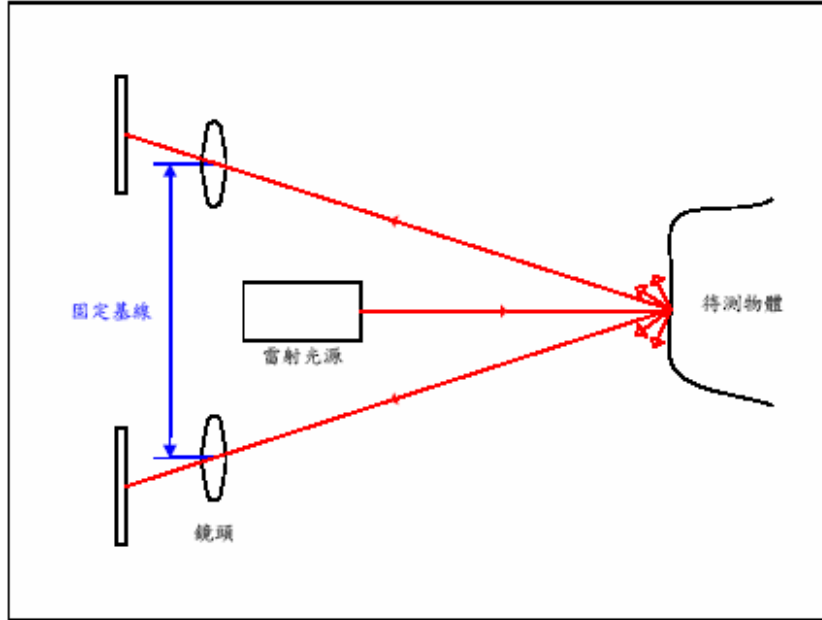


圖 2-5 雙相機三角幾何法 (Boehler, 2001; 黃偉城, 2004)



2-3 三維雷射掃瞄定位原理

三維雷射掃瞄的定位，是以掃瞄儀的雷射光源為原點而自成一個座標系，根據右手定則，以掃瞄儀的右側為 X 方向，正對目標物的方向為 Y 方向，而垂直軸方向為 Z 方向，如圖 2-6 所示；再藉由雷射光發射和接收的時間差和相位差，計算出雷射光源與掃瞄點之間的距離和角度，以計算出掃瞄點的相對點位座標。

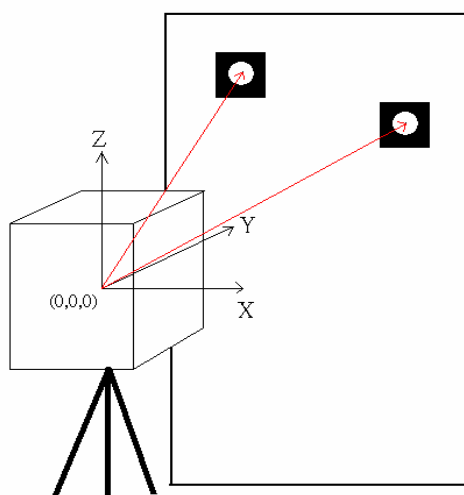


圖 2-6 以三維雷射掃瞄儀為原點的儀器座標系

一般的雷射掃瞄儀的依掃瞄次序可分為橫掃式和縱掃式。橫掃式是先固定垂直反射稜鏡，使掃瞄儀進行水平方向的掃瞄，之後垂直反射稜鏡轉動一角度，再繼續水平方向掃瞄；縱掃式則剛好相反，先固定水平方向反射稜鏡，進行垂直方向掃瞄，本研究所使用的 GS200 即為縱掃式。當掃瞄方式不同時，會造成不同定義的掃瞄角，可參照圖 2-7 所示，因此計算座標的公式也隨之改變。

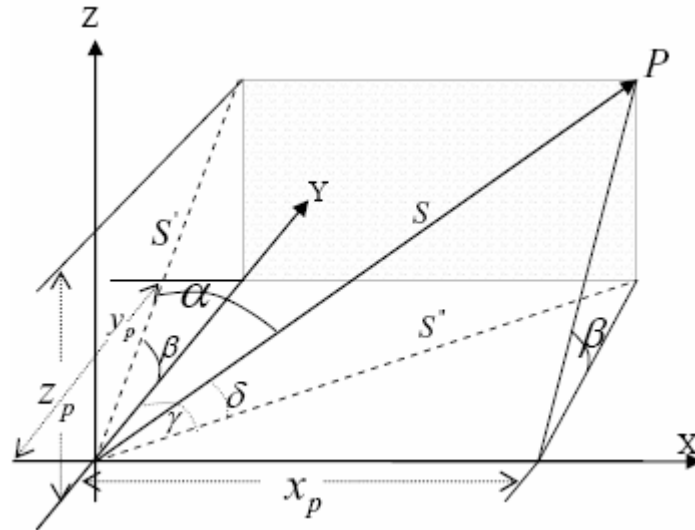


圖 2-7 三維雷射掃瞄定位(賴志凱，2004)

如果是橫掃式的，則掃瞄點 P 的座標依圖 2-7 上的 α 角和 β 角以及距離 S 進行計算；以上述條件，可用幾何關係列出公式 2-10 求得 P 點之三維座標。



$$S' = S \times \cos(\alpha)$$

$$x_p = S \times \sin(\alpha)$$

$$y_p = S' \times \cos(\beta) = S \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta)$$

$$z_p = S' \times \sin(\beta) = S \times \cos(\alpha) \times \sin(\beta) \quad (2-10)$$

如果是縱掃式的，如本研究所選用的 GS200，則掃瞄點 P 的座標依圖 2-7 上的 δ 角和 γ 角以及距離 S 進行計算；以上述條件，可用幾何關係列出公式 2-11 求得 P 點之三維座標。

$$S'' = S \times \cos(\delta)$$

$$x_p = S'' \times \sin(\gamma) = S \times \sin(\gamma) \times \cos(\delta)$$

$$y_p = S'' \times \cos(\gamma) = S \times \cos(\gamma) \times \cos(\delta)$$

$$z_p = S \times \sin(\delta) \quad (2-11)$$

由上述的公式推導可以得知，不同的掃瞄方式因其所定義的角度不同，因此求出的點位三維座標也會有所不同。



2-4 三維雷射掃瞄儀類型比較

雖然三維雷射掃瞄儀的定位原理大致相同，但因不同的有效掃瞄距離和精度的差異，而有不同的用途。曾義星及史天元(2002)依不同的掃瞄距離，將目前商業化的雷射掃瞄儀分為短、中、長距離以及航空雷射掃瞄儀等四種類型：短距離是指最長距離小於一公尺，通常用於小型模具；中距離則是指最長距離在 1~30 公尺者，多用於大型模具或室內空間之量測；而最長掃瞄距離大於 30 公尺者則屬於長距離，可用於建築物、土木工程等大型物體之測量；航空雷射掃瞄儀其最長距離常常大於一公里，且需配合精確的導航定位及方向系統，用於大範圍地表起伏之測量。以工程測量的觀點來看，通常使用長距離的雷射掃瞄儀最為適合。

目前有生產長距離雷射掃瞄儀的廠商並不多，在經過蒐集廠商網頁及文獻之後，列出較常見的七種雷射掃瞄儀規格，整理於表 2-1 及表 2-2。

表2-1 長距離雷射掃瞄儀廠商與產品型號（修改自曾及史，2002）

廠商	Callidus	CYRA	I-SiTE	Mensi	Optech	RIEGL
硬體型號	Callidus 3D Laser	Cyrax 2500	I-SiTE Scanner	GS100 & GS200	ILRIS-3D	LMS-Z420
軟體型號	3D Extractor	Cyclone 3.1	I-SiTE 3D Laser Imaging	Pointscape & Realworks	ILRIS-3D Parser	3D-Riscan

表 2-2 常見雷射掃瞄儀規格比較 (修改自曾及史, 2002)

型號	Callidus	Cyrax 2500	I-SiTE	GS100	GS200	ILRIS 3D	LMS-Z420
製造商	Trimble	Cyrax Technolog	I-SiTE	Mensi	Mensi	Optech Inc.	Riegl USA
Eye Safety	Class 1	Class 2	Class 1	Class 2	Class 2	Class 1	Class 1
Wavelength (nm)	905	532	904	N/A	N/A	N/A	904
Std Range(m)	32	1.5~50	2~300	2~100	2~200	350	2~250
Max Range(m)	150	100	450	N/A	300	800	1000
Range Accuracy (mm)	5	5	25	6	3~5	10	10
I FOV(mrad)	0.17	0.12	3	0.06	N/A	0.3	0.25
Scan Rate(Hz)	28000	1000	6000	1000	N/A	2000	9000
H FOV(deg)	360	40	340	360	360	40	360
V FOV(deg)	180	40	80	60	60	40	80
H angular Accuracy (deg)	0.017	N/A	N/A	0.018	N/A	N/A	0.0025
V angular Accuracy (deg)	0.03	N/A	N/A	0.018	N/A	N/A	0.002
Weight(kg)	15	20.5	13	13	13.6	12	14.5

在本論文之中，硬體部分所有實驗均是使用 Mensi 所生產的 GS200 型雷射掃瞄儀 (如圖 2-8 所示)，GS200 3D 雷射掃描儀承接了 GS100 三維掃描儀的各種優良功能，除了原有的長距離與高解析精度掃描之外，還發展出更遠的掃描距離，有效距離從 100 公尺提昇至 200 公尺，並可在短時間之內，得到快速且有效的數據資料，因此更

能符合各種長距離掃描專案的需求。在軟體的部分，GS200 所使用的
掃描儀控制軟體為 PointScape 2.1，而後續處理點雲資料以及進行
疊合則是使用 RealWorks Survey 軟體來進行。



圖 2-8 Mensi GS200 三維雷射掃描儀