

## 3D 點雲人臉辨識模式比較

洪本善<sup>1</sup> 陳鴻智<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>逢甲大學土地管理學系

<sup>2</sup>逢甲大學土木及水利工程研究所

### 摘 要

人臉辨識研究，以 2D 影像進行人臉辨識為主，現已逐漸以 3D 掃描技術進行人臉辨識。3D 人臉辨識方法，大都須先建立 3D 模型，其處理程序繁瑣，鮮少以 3D 點雲資料直接進行辨識。本研究利用 3D 點雲坐標資料直接進行人臉辨識，研究係以鼻尖為中心取出人臉剖面線和網格點的數學分析獨創計算模式，採均方根誤差(RMS)作為門檻值，進行辨識運算。本研究比較了三種模式，即(1)Rapidform(商用軟體)ICP 法，(2)縱、橫剖面線之點雲分析法，(3)網格點雲坐標分析法，結果發現模式(1)之辨識成功率為 89%，本研究採用鼻尖為中心之模式(2)及模式(3)，其結果顯示省略三維建模程序直接以點雲空間幾何概念進行辨識之方式可行，簡化了處理程序，並在 9 個選取樣本(72 對不同樣本)之測試條件下，證實可達到 100%人臉辨識率。

**關鍵詞：**3D人臉辨識，均方根誤差，門檻值，點雲

## Comparison of 3D Point Set Face Recognition Models

Pen-Shan Hung<sup>1</sup>, Hung-Zi Chen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Land Management, Feng Chia University

<sup>2</sup>Institute of Civil and Hydraulic Engineering, Feng Chia University

### ABSTRACT

In the face recognition, the job was almost done with 2D images. At the advent of 3D scanning technology, face recognition has evolved from 2D to 3D. Of the 3D face recognition methods, 3D face model usually has to be set-up firstly, and then to identify the recognition. The process of 3D modeling is cumbersome, and rarely directly use the 3D point set data to identify treatment. In this study, the 3D point set is directly used for face recognition. Before recognition, the tip of nose has to be recognized. Then, two point sets along the longitudinal and cross-section profiles through the tip of nose and grid point set are interpolated around the tip of nose. In comparison to a different pair of face point sets, the root mean square (RMS) error is utilized as a threshold value to check whether the pair of point sets are scanned from the same person or not. Three models are compared, (1) Rapidform ICP method, (2) profile point-set analysis, (3) grid point-set analysis. Experimental results demonstrate that the recognition success rate is 89% by model (1), 100% by model (2), and 100% by model (3), respectively. It is shown that without building any 3D mold the face recognition is feasible. The proposed method could reach the face recognition rate of 100% under the 9 selected samples (72-pair comparison) test conditions.

**Keywords:** 3D face recognition, RMS, threshold value, point set

文稿收件日期 101.11.26; 文稿修正後接受日期 102.4.16; \*通訊作者

Manuscript received November 26, 2012; revised April 16, 2013; \*Corresponding author

## 一、前言

近年來國際間發生了幾件重大的恐怖攻擊事件，如美國的九一一事件、印尼巴厘島事件，直接造成人民生命財產重大損傷，間接的對當事國家的經濟帶來嚴重傷害，甚而對全球經濟產生長久而深遠的影響，經濟的恢復的時間需要長達數年或數十年。這幾件的災害曝露了現存繁複而龐雜的安全防護措施對恐怖攻擊仍存有相當多的弱點，如何補強，成為各方關切的重點，於是各個國家負責國家安全的機構，紛紛積極地投入再強化維安的研究，期以將恐怖攻擊發生的風險降至最低，在人員身份辨識方面以針對人體或人行為特徵的研究最為多[1]。

人體當中，最直接也最容易作為辨識的部位就是臉，人臉辨識是一個複雜的模式識別問題，近年來受到廣泛的關注，識別領域的各種方法在這個問題上各顯所長，而且發展出了許多新方法，大大豐富和拓展了模式識別的的方向，以往的研究大多以 2D 辨識為主，從圖像中分割出不包括背景的人臉區域進行分析與辨識，在辨識、檢測、跟蹤、特徵定位等研究均取得了顯著成果[2][3]。近些年，3D 攝影硬體與軟體技術的進化，3D 資料取得變得容易與快速，所費也變得越來越便宜，由於 3D 人臉圖像更能貼切呈現出我們所熟悉的身影，輔以的辨識效果則更為容易簡單。

3D 人臉資料的獲得有採用攝影照像或雷射掃描方式，當前辨識的方法大多由人臉建模開始，因受建模步驟限制，無法達快速與即時完成辨識；本研究以雷射掃描方式獲取 3D 人臉資料，以跨鼻尖取出人臉剖面線及網格點的數學分析計算獨創模式，以不建模及找尋特徵點的方法，以達成辨識的成果並與現有 Rapidform 3D 模型處理軟體之 ICP(Iterative Closest Point)疊代最近點法作比較。

## 二、文獻回顧

人臉辨識時，有採用膚色訊息，運用型態學運算(Morphology operation)與動態樣板運算(Deformable template method, DTM)方法抽取 2D 影像中眼睛特徵部位，藉以定出整個人臉位置。追蹤與鎖定人臉的工作則交由人臉追蹤模組負責；再經過徑向基函數(Radial

Basis Function, RBF)類神經網路作人臉辨識，可以動態累積過去經驗進行身分辨識。50 人的樣本，實驗結果達 96% 辨識率[4]。

使用人工智慧作人臉辨識器者亦為近年來常見的方法之一，類似空間幾何關係概念的 KNN(k-Nearest Neighbor algorithm)及 RBFNN (Radial Basis Function Neural Networks)類神經網路的探討[5]，在 15 個人分別以 5 個不同位置拍攝 300 張影像的樣本研究中，以其中的 10 人 150 張作為學習樣本，50 張作為測試樣本，結果顯示辨識率達 100%。另以其餘 5 人(100 張影像)當作入侵偵測，實驗結果達到 97% 正確偵測率及 99% 錯誤排除率。

至於以臉部相似程度很高為研究對象的人臉辨識，有將家庭成員正面影像做為訓練樣本，首先利用積分影像結合 Haar 函數及 AdaBoost 演算法，將灰階化影像中臉及臉部區域部份(眼、鼻、嘴)偵測出，再以矩型框出後，加以正規化取得的臉與臉部區域部份影像後，以主成份分析(PCA)法取出臉及區域臉部的影像特徵向量，在特徵空間(Eigen space)中建立各特徵資料庫。當系統執行即時辨識時，將測試影像之臉及區域臉部的特徵，投影在特徵空間中與各特徵資料庫比對。為避免光照變化，利用 Retinex 法強化影像特徵；另為避免影像歪斜影響，採眼線水平校正；同時為減少表情影響，依其重要性調整估算權重，以提高辨識率。實驗結果達 96% 以上辨識率[6]。

亦有學者嘗試 2.5D 人臉影像辨識，2.5D 人臉影像是由人臉面部高低起伏圖(Range Map)與人臉紋理圖(Texture Map)構成，將上兩者圖像 x 軸與 y 軸構成的平面分成 16 份面積大小均等的正方形，而 z 軸為人臉部位的深度資料，以小片大地距離方法(Patch Geodesic Distance, PGD)從高低起伏圖計算出面部形狀及再以 PGD 法轉換成紋理圖，以確保兩張紋理圖貼合比較時，不會因視角的不同而生紋理變動，經驗證不同的面部表情(如生氣、沮喪、恐懼、快樂、悲傷、驚嚇)、不同面部姿態(如眼部上仰、下俯)與不同的臉部側轉角度(向左向右轉 10°、20°、30°、45°)的結果，達 84.8% 辨識率，而採用類似概念的極坐標大地線法僅達 80.3% 辨識率，Canonical 影像法僅達 77.2% 辨識率[7]。

三維人臉辨識時，可選用較不受角度限制的 Z 軸坐標值當作計算的原始資料，研究顯示

於人臉側向角度大幅度的改變下，以主成份分析(PCA)法將高維資料訊息降低成為一維訊息，便於取出臉部的影像特徵，可辨識出正確的結果，研究建議將三維點雲組成不規則三角形面並計算其法向量，以改善在距離上的限制[8][9]。

另有學者提出在無法取得正面影像情況時，可以將事先已有的3D人臉資料庫作臉側影的比對辨識，此資料庫存有3D人臉資料所構建出不同姿態下的臉側影線幾何模型，臉側影線分別記錄臉部特徵點(如上額頭、中額頭、...、下巴等14個)，然後再將所萃取出來的2D側面影像之側影線再與之比對，可辨識出正確的結果[10]。

人臉辨識因為臉資料來源的不同(如影像或點雲)，臉部膚色、光影、姿態、取像角度，及採用的辨識方法的不同，而使得辨識成功率各有不同的結果，當前辨識大多仍以2D資料為探討對象，3D方面的探討近年來逐漸增加，其資料來源，以3D雷射掃描方式為主，亦有利用影像建模的方式產生3D資料[11]。

總結人臉點雲辨識，需經過旋轉、貼合等過程，貼合緊緻程度的判斷，似為關鍵，探討人臉辨識的方法則有以統計概念、空間幾何關係概念、人工智慧概念等幾個方法作探討，各

種方法均有其優劣，大體上的作法多將人臉從建立模型開始，因受建模步驟繁複及人臉影像或點雲資料內容數量龐大的限制，無法達到快速與即時完成辨識。至於人臉部資料來源大都以拍攝照片之影像與雷射掃描之點雲等2種為主，作人臉辨識時，有單獨以影像或點雲作為研究題材，亦有將兩種結合作為研究對象，從表1整理的結果分析，以影像為研究對象的辨識成功率介於50%至97%之間，而以點雲為研究對象的辨識成功率介於72%至100%之間。再分析所採用的辨識方法，以統計概念為背景的PCA法，辨識成功率為95~97%、SVM(Support vector machine)法為96%；以空間幾何關係概念為背景的Closest vector法為94%、ICP法為98%、Weighted Hausdorff法為98%、最短距離法為96%、Patch Geodesic Moments法為84.8%；以影像處理為背景的Canonical forms法為100%、Multiple法為99%及與人工智慧概念為背景的Deformable model法為90%，GRNN法為50%，其中以使用點雲資料的辨識率較使用影像者為高，而辨識率高低，與樣本數多寡似無直接的關係。直接利用3D點雲坐標資料進行人臉辨識，而不建模的探討者較少，值得進一步探討。

表 1. 人臉辨識資料、方法、辨識成功率

年代	作者	人臉資料	樣本數	研究方法	辨識率
2003	Hesher [1]	影像	37	PCA	97%
2003	Lee[1]	影像	35	Closest vector	94%
2003	Medioni[1]	點雲	100	ICP	98%
2003	Moreno[1]	特徵點選取	60	Closest vector	78%
2003	Pa[1]	點雲 影像	30	Hausdorff 距離及 PCA	3-5% Error, 5-7% Error
2003	鏡逸聰等 6 人[4]	影像	50	RBF	96%
2004	Lee[1]	點雲	42	Weighted Hausdorff	98%
2004	Lu[1]	點雲	18	ICP	96%
2004	Russ[1]	影像	200	Hausdorff distance	98% verification
2004	Xu[1]	點雲 影像	120 30	最小距離	72% 96%
2005	Bronstein[1]	點雲	30	Canonical forms	100%
2005	Chang[1]	點雲	466	multi-ICP	92%
2005	Gökberk[1]	點雲	106	多重比對	99%

2005	Lee[1]	影像	100	SVM	96%
2005	Lu[1]	點雲	100	ICP, TPS	89%
2005	Pan[1]	影像	276	PCA	95%, 3% Error
2005	Passalis[1]	點雲	466	Deformable model (神經網路)	90%
2005	Russ[1]	影像	200	Hausdorff 距離	98.5%
2006	Samala[1]	影像	94	General Regression Neural, GRNN 類神經網路	50%
2010	梁振升[5]	影像	150	KNN, RBFNN 類神經網路	97%
2011	Farshid etc.[15]	影像	25	Patch Geodesic Moments	不同面部表情時:84.8% 不同面部姿態、側轉角 度時:69.1%

資料來源：[1]及本研究整理。

### 三、 資料收集與處理

#### 3.1 資料收集

本研究的人臉資料，係使用 Konica Minolta 公司所生產具寬廣量測範圍，高精度與高分辨率三維立體掃描儀 VIVID 910 3D[12]，作資料採集，該儀器設備如圖 1 所示，其量測原理為採用雷射三角光線區塊法，雷射光透過旋轉平面鏡的作用以不同的角度從鏡頭孔射出道道光束掃描人的臉部，再通過 CCD 傳感器收集人臉表面反射的雷射光束，每條反射回來的雷射光包含人臉各處點位的數據，諸如空間位置坐標與該處顏色值。



圖 1. Konica Minolta-VIVID 910 3D 立體雷射掃描儀。

本研究共掃描 4 位年輕男性與 5 位年輕女性，他們的年紀約為 22 歲左右，掃描的角度以約略正面，即臉正對雷射掃描儀的鏡頭，此時的掃描角度稱為 0 度，另外再將臉左、右各側轉約 10 度，分別予以掃描，圖 2 為 0 度掃描點雲成果示意，圖 3 為 10 度掃描點雲成果示意。採集的樣本數共有 27 個。



圖 2. 0 度掃描點雲成果示意圖。

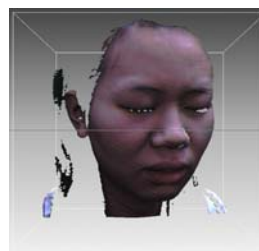


圖 3. 10 度掃描點雲成果示意圖。

### 3.2 資料處理

由於掃描時，會將樣本所在處身後的牆一併進行掃描，故所得到的點雲資料包含有牆面信息，原始點雲圖如圖 4 所示，需將之篩選去除而留下人臉部分的雲資資料。本研究使用 Rapidform 3D 模型處理軟體，自動化將牆面點雲資料篩選後並刪除，留下臉部五官部分，圖 5 為篩選後留下臉五官示意圖。

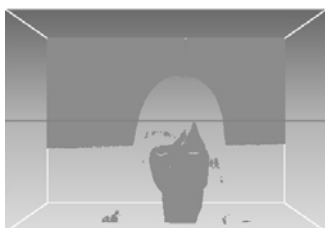


圖 4：原始點雲示意圖。

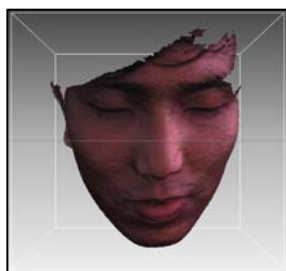


圖 5.篩選後留下臉五官示意圖。

## 四、研究方法與內容

本研究採用三種方法，第一種方法：Rapidform 軟體內訂之 ICP 法；第二種方法：縱、橫剖面線點雲分析法；第三種方法：網格式點雲坐標分析法。各方法的內容分述如下：

### 4.1 商用 Rapidform 3D 模型軟體內訂之 ICP 法

Rapidform 3D 模型軟體內訂之 ICP 法 [13]，係將 3D 點雲中最鄰近的點以 3 點形成一個小平面方式組合成曲面，本研究使用 Rapidform 3D 模型軟體將 27 個樣本的點雲作均勻化(Smooth)處理整理成均勻格子狀，因點雲資料大，計算機運算時間長，本研究進一步將點雲資料篩減稀釋成 90%、80%、...至 10% 等作判釋，研究發現，稀釋至 30% 以下時，無法進行貼合比對，故在不影響辨識結果下，將

點雲資料篩減稀釋至 40% 資料量，可以縮短計算機運算時間，可加速完成辨識計算。完成點雲資料篩減稀釋後再以 ICP 法作貼合辨識，因 Rapidform 3D 模型軟體系統內訂的最佳收斂值建議為 0.008mm，故本研究收斂門檻值設定為 0.01mm，若貼合結果大於該值時，則判定為不同人。貼合結果以收斂值的方式呈現，ICP 法研究流程如圖 6 所示。

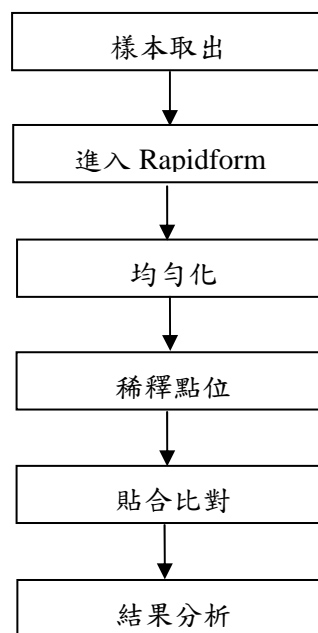


圖 6. ICP 法流程圖。

### 4.2 縱、橫剖面點雲分析法

人臉部為左右對稱，以 3D 的角度觀察整個臉部，最前方的點是鼻尖，本研究以鼻尖為基準，於點雲坐標群中找出 z 坐標值最大者即鼻尖坐標，由於人臉掃描的點雲呈現不規則分布，與鼻尖同縱、橫坐標之剖面線上的對應點數量不多，以能貼切表示臉部曲面的 Kriging 法 [14]，內插出間隔 0.05mm 剖面線上之點雲，以直線擬合，此擬合直線作為每個樣本的參考基準線。縱、橫剖面點雲分析法研究流程如圖 7 所示。

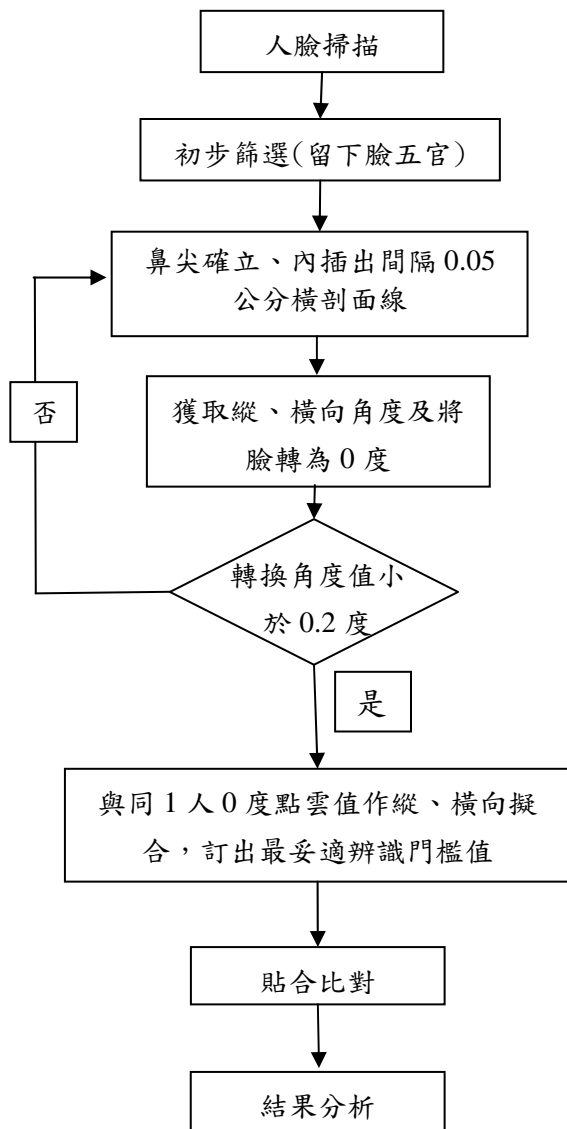


圖 7. 縱、橫剖面點雲分析法流程圖。

假設同一人臉部沒有畸變，不同時期通過鼻尖剖面線上點雲擬合直線應該十分近似。換句話說，此擬合直線與該人臉上的特徵點的相對關係(如距離、角度)應該不會改變。計算此擬合直線與剖面直線間之夾角，即為樣本橫向的轉正角度。圖 8 為縱、橫剖面示意圖。由於每個人的鼻子大小高低與臉型變化應不盡相同的，故每個人臉的橫、縱剖面擬合作

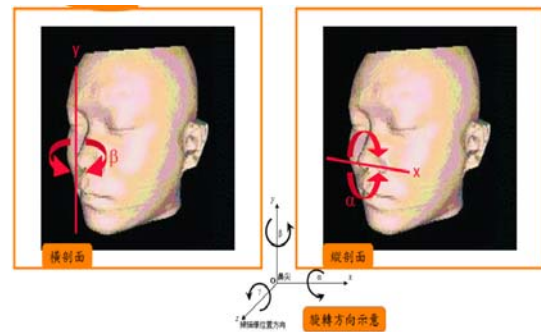


圖 8. 縱、橫剖面示意圖。

縱、橫剖面點雲分析時，首先將每組樣本中臉部左、右各側 10 度角度的點雲資料，經坐標轉正為 0 度角成果，每次完成轉換後，再次尋找新的鼻尖坐標，並重新取得橫剖面坐標並計算新的轉正角度，如此迭代多次，直到轉換角度值小於 0.2 度為止。以縱剖面取點範圍 8 公分來看，若其夾角為 0.2 度，其圓周長約等於 0.02 公分，其值小於內插密度 0.05 公分，故以 0.2 度為收斂旋轉角度，其值是不會對辨識造成影響。

再取出相同人的點雲資料作貼合比較，計算出兩者之偏離值 RMS(Root Mean Square)，其公式如下：

$$RMS = \sqrt{\frac{v^T v}{n}} \quad (1)$$

其中： $v$  為剖面點雲貼合差， $n$  為剖面點數量。

9 組樣本為同一人之不同樣本的貼合比較，其縱剖面 RMS 值分別落於 0.81~2.78mm 之間，橫剖面 RMS 值則分別落於 0.88~2.02mm 之間，是以，若縱剖面門檻值大於 2.78mm，橫剖面大於 2.02mm 時，判定辨識結果為不同人。9 組樣本為相同人之不同樣本的貼合比較 RMS 值如表 2 所示。

線的位置與方向應是不完全相同的，剖面擬合線與鼻尖的垂直距離也不盡相同，而相同人的剖面擬合線與鼻尖的垂直距離應是接近的，故本研究人臉辨識中加入此辨識元素。各樣本之剖面擬合線與鼻尖的垂直距離比較結果，如表 3 所示。

表 2. 同人不同樣本貼合比較 RMS 值表 (單位:mm)

樣本	A	B	C	D	E	F	G	H	I
縱剖面貼合	1.60	1.66	2.78	1.62	1.74	0.81	2.04	1.53	1.18
橫剖面貼合	1.02	2.02	1.81	0.88	1.16	1.50	1.76	1.15	0.98

表 3. 剖面擬合線與鼻尖的距離比較表

(表內\*：為含有雜訊計算之值，單位:mm)

樣本	角度 (度)	橫剖面擬合線 與鼻尖距離	同人不同樣本 距離差絕對值	縱剖面擬合線 與鼻尖距離	同人不同樣本 距離差絕對值
A	0	18.72	0.27	16.56	0.05
	10	18.45		16.61	
B	0	18.51	0.48	15.12	0.16
	10	18.99		15.28	
C	0	16.92	0.18	13.52* (12.55)	2.52* (0.01)
	10	17.1		16.04* (12.56)	
D	0	18.22	0.27	18.68	0.42
	10	18.5		18.26	
E	0	18.45	0.05	14.87	1.04* (0.37)
	10	18.5		15.91* (15.25)	
F	0	19.71	0.27	14.45	0.04
	10	19.98		14.41	
G	0	13.29* (7.63)	0.86* (0.36)	12.87	0.10
	10	14.15* (7.99)		12.77	
H	0	19.86	0.17	15.55	0.06
	10	19.69		15.48	
I	0	19.52	0.19	16.1	0.53
	10	19.33		16.62	

由表 3 中可得知，同一人臉 0 度與 10 度轉正後，縱剖面擬合線與鼻尖距離垂直距離差值位於 0.04~2.52mm 之間，其中最大值为樣本 C 之 2.52mm 與次大值为樣本 E 之 1.04mm，該 2 值均較其餘各值大了許多，經詳細察看樣本 C 與樣本 E 的點雲資料，發現縱剖面擬合線計算時，皆有頭額的髮稍點雲雜訊資料(現階段尚未進行臉部點部雜訊自動處理)，因此於計算縱剖面擬合線時產生異常值，故以人工方式剔除雜訊點雲，於是得到修正的比較值各為 0.01、0.37mm，縱剖面至鼻尖距離垂直距離之門檻值設定為 0.53mm；至橫剖面擬合線與鼻尖距離垂直距離差值則位於

0.05~0.86mm 之間，分析發現，其中最大值为樣本 G 之 0.86mm，約為次大值樣本 B 之 0.48mm 的 2 倍，亦較其餘各值大了許多，詳細察看樣本 G 的點雲資料，發現橫剖面擬合線計算時，樣本 G 之鼻尖附近亦有雜訊點雲，故予以人工剔除後重新計算差值為 0.36mm，於是，橫剖面至鼻尖距離垂直距離之門檻值設定為 0.48mm。

整理縱、橫剖面點雲分析法人臉辨識門檻值，如表 4 所示，樣本測試時，若其 4 個值均小於表中門檻值者，判定為同一人，否則為不同人。

表 4. 縱、橫剖面點雲分析法人臉辨識門檻值 (單位: mm)

項目	門檻值
剖面線貼合 RMS 值	縱剖面: 2.78
	橫剖面: 2.02
剖面線至鼻尖距離	縱剖面: 0.53
	橫剖面: 0.48

### 4.3 網格點雲坐標分析法

本研究以鼻尖為中心之矩形區域，以 Kriging 插值法計算出每隔 0.05mm 直至矩形邊界之相應範圍網格點，再將一對樣本之網格點雲進行坐標轉換成同一坐標系統後進行貼合，比較 z 軸方向的差異值作為辨識基準。網格點雲坐標分析法之貼合示意如圖 9。

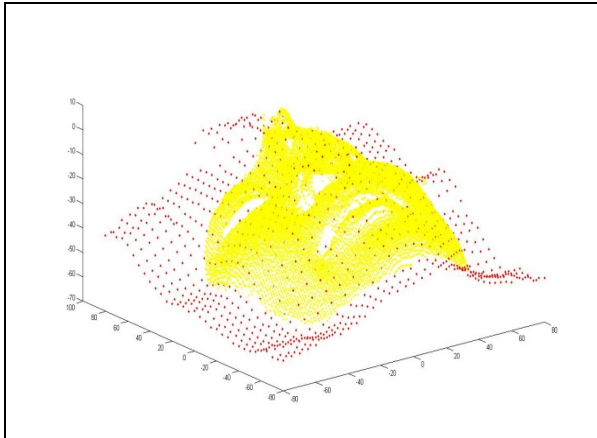


圖 9. 網格點雲坐標分析法之貼合示意圖。

網格點雲坐標分析法之坐標表示式為：

$$\begin{cases} x_i = x_0 \pm i \cdot s_0 \\ y_i = y_0 \pm j \cdot s_0 \\ z_i = f(x_i, y_i) \end{cases} \quad (2)$$

其中， $x_0, y_0, z_0$  表示鼻尖位置，令  $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$ ； $i, j = 1, 2, \dots, n$ ； $s_0$  為距離變數(如 0.5, 1,  $\dots$ , 5mm)； $x_i$  為從鼻尖  $x_0$  開始向左或右偏移  $s_0$ ； $y_j$  為從鼻尖  $y_0$  開始向上或下偏移  $s_0$ ； $z_i = f(x_i, y_i)$  為依據鄰近點雲坐標內差值。將計算完成後的  $x_i, y_i, z_i$  再進行坐標轉換[15]。

有關坐標轉換公式說明如下，設 3 維坐標系統 x 軸、y 軸、z 軸分別繞原點 O 逆時鐘方向旋轉  $\alpha, \beta, \gamma$  角度，如圖 10 所示。

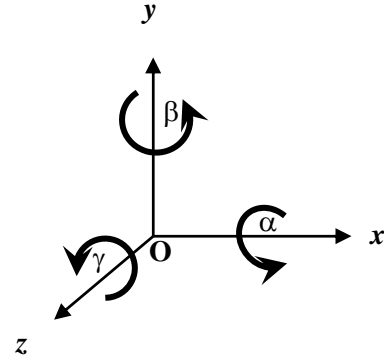


圖 10. 坐標軸繞原點逆時鐘方向旋轉示意圖。

設 x 坐標軸的旋轉角度為  $\alpha$ ，y 坐標軸的旋轉角度為  $\beta$ ，z 坐標軸的旋轉角度為  $\gamma$ ；x、y、z 坐標各別的逆時鐘方向之旋轉矩陣  $R_x(\alpha)$ 、 $R_y(\beta)$ 、 $R_z(\gamma)$ ，表示如公式(3)：

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

當 x、y、z 坐標一起旋轉時，其旋轉矩陣表示如公式(4)：



$$R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \alpha & -\sin \beta \cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \beta & -\cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha + \sin \gamma \cos \alpha & -\cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \\ -\sin \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha + \cos \gamma \sin \alpha \\ \sin \beta & -\cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

坐標軸旋轉前、後，坐標之間的關係表示如公式(5)：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_p = (1+m)R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， $[x \ y \ z]_p^T$  為旋轉後坐標值， $[x \ y \ z]_s^T$  為旋轉前坐標值， $m$  為尺度比差異因子， $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  為點雲群彼此間之平移量。

由於 3D 人臉樣本之尺度相同，所以尺度比差異因子假設為  $m=0$ 。設(5)式中的  $[x \ y \ z]_p^T$ ， $[x \ y \ z]_s^T$  為已知量， $\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z$  為待求項，假定  $\alpha$  有近似值  $\alpha_0$ 、 $\beta$  有近似值  $\beta_0$ 、 $\gamma$  有近似值  $\gamma_0$ 、 $\Delta x$  有近似值  $\Delta x_0$ 、 $\Delta y$  有近似值  $\Delta y_0$ 、 $\Delta z$  有近似值  $\Delta z_0$ ，公式(5)之待求項  $\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z$  之最佳值為：

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} &= \alpha_0 + d\alpha \\ \hat{\beta} &= \beta_0 + d\beta \\ \hat{\gamma} &= \gamma_0 + d\gamma \\ \Delta \hat{x} &= \Delta x_0 + dx \\ \Delta \hat{y} &= \Delta y_0 + dy \\ \Delta \hat{z} &= \Delta z_0 + dz \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $d\alpha$ 、 $d\beta$ 、 $d\gamma$ 、 $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$ ，分別是對各變量所取的偏導數伴隨之各值的微變值待估，故可以將公式(5)按 Taylor 公式在  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0; \Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0$  處展開，整理如公式(7)所示：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_p + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & 1 & 0 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ d\alpha \\ d\beta \\ d\gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中，

$$\begin{aligned} a_{11} &= y_s (\cos \gamma_0 \sin \beta_0 \cos \alpha_0 - \sin \gamma_0 \sin \alpha_0) \\ &\quad + z_s (\cos \gamma_0 \sin \beta_0 \sin \alpha_0 - \sin \gamma_0 \cos \alpha_0) \\ a_{12} &= x_s (-\cos \gamma_0 \sin \beta_0) \\ &\quad + y_s (-\sin \gamma_0 \sin \beta_0 \sin \alpha_0 + \cos \gamma_0 \cos \beta_0 \sin \alpha_0) \\ &\quad + z_s (\cos \gamma_0 \cos \beta_0 \cos \alpha_0) \\ a_{13} &= x_s (-\sin \gamma_0 \cos \beta_0) \\ &\quad + y_s (-\sin \gamma_0 \sin \beta_0 \sin \alpha_0 + \cos \gamma_0 \cos \alpha_0) \\ &\quad + z_s (\sin \gamma_0 \sin \beta_0 \cos \alpha_0 + \cos \gamma_0 \sin \alpha_0) \\ a_{21} &= y_s (-\sin \gamma_0 \sin \beta_0 \cos \alpha_0 - \cos \gamma_0 \sin \alpha_0) \\ &\quad + z_s (-\sin \gamma_0 \sin \beta_0 \sin \alpha_0 + \cos \gamma_0 \cos \alpha_0) \\ a_{22} &= x_s (\sin \gamma_0 \sin \beta_0) \\ &\quad + y_s (-\sin \gamma_0 \cos \beta_0 \sin \alpha_0) \\ &\quad + z_s (\sin \gamma_0 \cos \beta_0 \cos \alpha_0) \\ a_{23} &= x_s (-\cos \gamma_0 \sin \beta_0) \\ &\quad + y_s (-\cos \gamma_0 \sin \beta_0 \sin \alpha_0 - \sin \gamma_0 \cos \alpha_0) \\ &\quad + z_s (\cos \gamma_0 \sin \beta_0 \cos \alpha_0 - \sin \gamma_0 \sin \alpha_0) \\ a_{31} &= y_s (-\cos \beta_0 \cos \alpha_0) \\ &\quad + z_s (-\cos \beta_0 \sin \alpha_0) \\ a_{32} &= x_s (-\cos \gamma_0 \cos \alpha_0) \\ &\quad + z_s (-\sin \beta_0 \cos \alpha_0) \\ a_{33} &= 0 \\ b_1 &= x_s (\cos \gamma_0 \cos \beta_0) \\ &\quad + y_s (\cos \gamma_0 \sin \beta_0 \sin \alpha_0 + \sin \gamma_0 \cos \alpha_0) \\ &\quad + z_s (-\cos \gamma_0 \sin \beta_0 \sin \alpha_0 + \sin \gamma_0 \sin \alpha_0) \\ &\quad + \Delta x_0 \\ b_2 &= x_s (-\sin \gamma_0 \cos \beta_0) \\ &\quad + y_s (-\sin \gamma_0 \sin \beta_0 \sin \alpha_0 + \cos \gamma_0 \cos \alpha_0) \\ &\quad + z_s (\sin \gamma_0 \sin \beta_0 \cos \alpha_0 + \cos \gamma_0 \sin \alpha_0) \\ &\quad + \Delta y_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_3 &= x_s (\sin \beta_0) \\
 &+ y_s (-\cos \alpha_0 \sin \beta_0) \\
 &+ z_s (\cos \beta_0 \cos \alpha_0) \\
 &+ \Delta z_0
 \end{aligned}$$

將公式(7)左邊的 $[x \ y \ z]^T_p$ 項移至公式右邊，整理如公式(8)所示：

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & 1 & 0 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ d\alpha \\ d\beta \\ d\gamma \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_p - b_1 \\ y_p - b_2 \\ z_p - b_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

公式(8)以矩陣表達，如公式(9)所示：

$$V = AX - \ell \quad (9)$$

其中，

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \text{ 為待求矩陣}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & 1 & 0 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ 為係數矩陣}$$

$$X = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ d\alpha \\ d\beta \\ d\gamma \end{bmatrix} \text{ 為轉換參數矩陣}$$

$$\ell = \begin{bmatrix} x_p - b_1 \\ y_p - b_2 \\ z_p - b_3 \end{bmatrix} \text{ 為常數矩陣}$$

公式(9)依最小二乘法 (Least-squares Adjustment) 求解 (假設各點雲坐標之觀測誤差相同)，得到 X 結果如公式(10)：

$$X = (A^T A)^{-1} A^T \ell \quad (10)$$

網格點雲坐標分析法之研究流程如圖 11 所示。

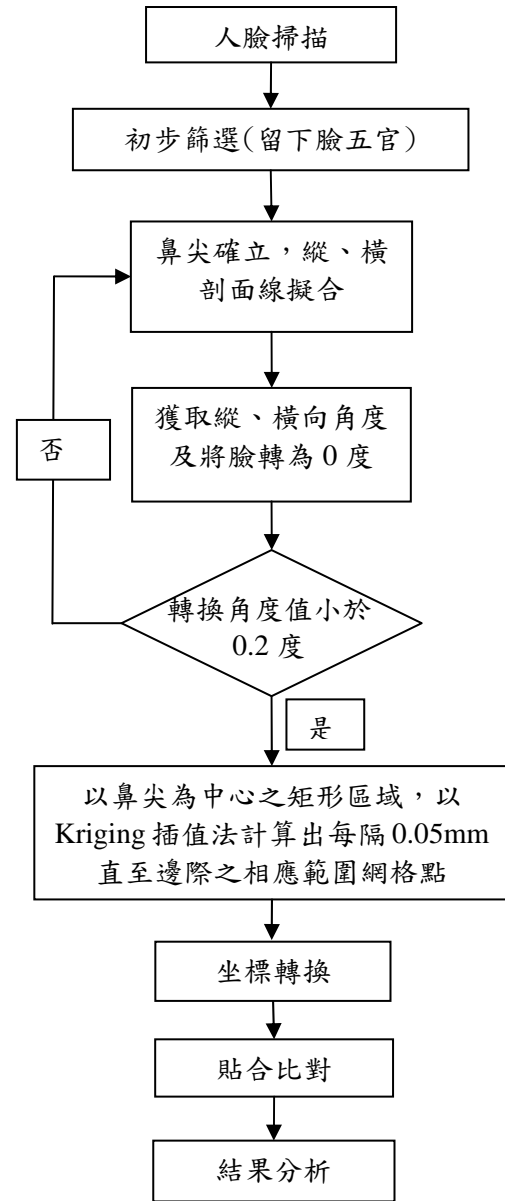


圖 11. 網格點雲坐標分析法流程圖。

經過上述轉換之後，進行貼合比對，取相同人以鼻尖為中心之不同矩形區域 30mm×30mm、40mm×40mm、50mm×50mm、及全部臉範圍的點雲資料作貼合比對，計算出兩者的偏離值 RMS 值，計算如公式(1)，計算結果如表 5 所示。

表 5. 同人不同樣本不同區域大小之貼合比較 RMS 值表 (單位:mm)

樣本	A	B	C	D	E	F	G	H	I
30mm×30mm 方格 RMS 值	0.36	0.43	0.28	0.19	0.31	0.24	0.13	0.27	0.18
40mm×40mm 方格 RMS 值	0.89	0.67	0.72	0.67	0.73	0.51	0.28	0.74	0.46
50mm×50mm 方格 RMS 值	0.86	0.79	0.62	0.75	0.68	0.95	0.91	1.04	0.82
全臉範圍 RMS 值	1.88	1.76	2.1	1.74	1.9	1.06	2.01	1.98	2.56

由表 5 中可得知，同一人臉 0 度與 10 度轉正後，以 30mm×30mm 方格範圍作貼合時，RMS 值位於 0.13~0.43mm 之間，40mm×40mm 方格的 RMS 值位於 0.28 ~0.89mm 之間，50mm×50mm 方格的 RMS 值位於 0.62~1.04mm 之間，全臉範圍的 RMS 值位於

1.06~2.56mm 之間，故設定 30mm×30mm、40mm×40mm、50mm×50mm 方格、全臉範圍的門檻值分別為 0.43mm、0.89mm、1.04mm、2.56mm，若 RMS 值大於此門檻值判定為不同人，若小於則判定為同一人。結果整理如表 6。

表 6. 不同區域大小之網格式點雲坐標分析法網格式點雲坐標分析法人脸辨識門檻值

項目	門檻值 (單位:mm)
30mm×30mm 方格	0.43
40mm×40mm 方格	0.89
50mm×50mm 方格	1.04
全臉範圍	2.56

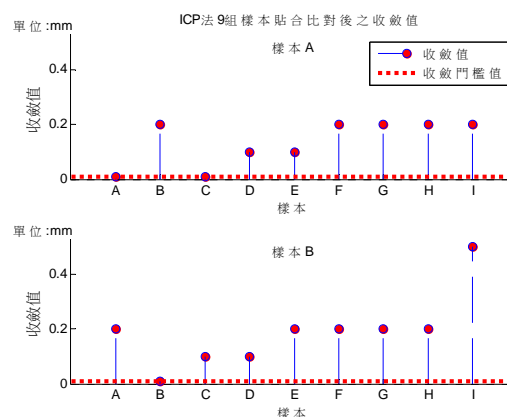
## 五、結果與檢討

### 5.1 ICP 法

ICP 方法之計算結果如圖 12 以樣本 A 為例 (如圖上之最上端的樣本 A 部分所示)，首先將樣本 A 分別與樣本 A 自身、樣本 B、...、I 等 9 個樣本逐一作貼合比對，計算收斂值，圖中的橫坐標表示樣本名稱，縱坐標表示 Rapidform 計算之收斂值。以紅色粗點虛線表示 ICP 法的收斂門檻值 0.01mm，樣本 A 與各個樣本間的貼合計算之收斂值，則以火柴棒紅點表示。

9 組樣本經上述步驟，共作了 81 對的貼合比對，各樣本收斂值結果，如圖 12 所示，結果分別介於 0.1mm~0.5mm 範圍之間，若樣本與自身作互相比對時，收斂值皆不超過 0.01mm，此外樣本 A 與 C、或樣本 C 與 A 貼

合比對時，收斂值亦未超過 0.01mm，顯然以 Rapidform ICP 無法辨別樣本 A 與 C 之不同，屬於判斷失誤。至於其餘樣本收斂值都大於 0.01mm 的收斂門檻值，並無誤判，此方法的辨識成功率為 89%。



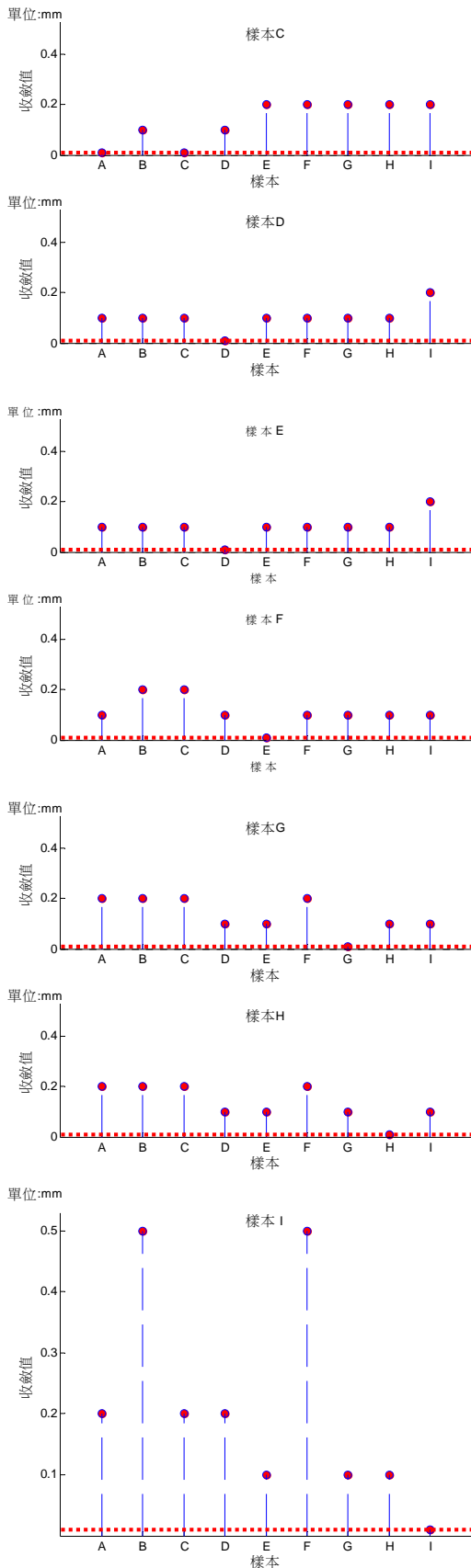
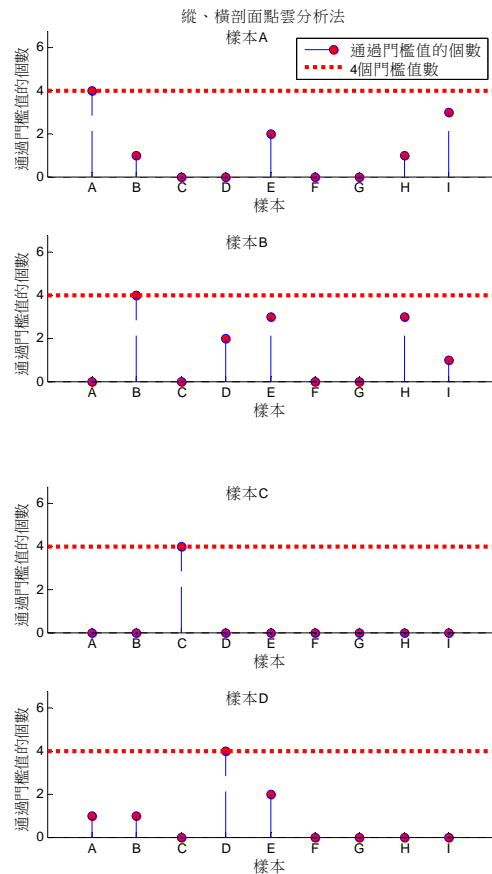


圖 12. ICP 法樣本貼合比對後之收斂值圖。

## 5.2 縱、橫剖面點雲分析法

本項方法，同樣以樣本 A 為例，說明如下，首先將樣本 A 分別與樣本自身、樣本 B、...、I 等 9 個樣本逐一作貼合比對，計算通過門檻值的個數，9 組樣本都經上述步驟，分別完成貼合比對，共作了 81 對的計算比對，各樣本通過門檻值的個數，如圖 13 所示圖中的橫坐標表示樣本名稱，縱坐標表示通過門檻值的個數。紅色粗點虛線表示必須達到的 4 個辨識門檻值 (分別為橫剖面 RMS 值 2.02 mm，縱剖面 RMS 值 2.78 mm，橫剖面擬合線至鼻尖距離之較差值 0.48 mm，縱剖面擬合線與鼻尖距離之較差值 0.53 mm)，樣本彼此間貼合比對通過門檻值的個數，則以火柴棒紅點表示。測試發現，只有在樣本自身貼合比對時，通過門檻值的個數達到 4 個門檻值，而不同樣本間，通過門檻值的個數則分別介於 1 至 3 個，都無法同時達到 4 個門檻值的要求，結果顯示可以辨別出樣本的不同，辨識成功率為 100%。



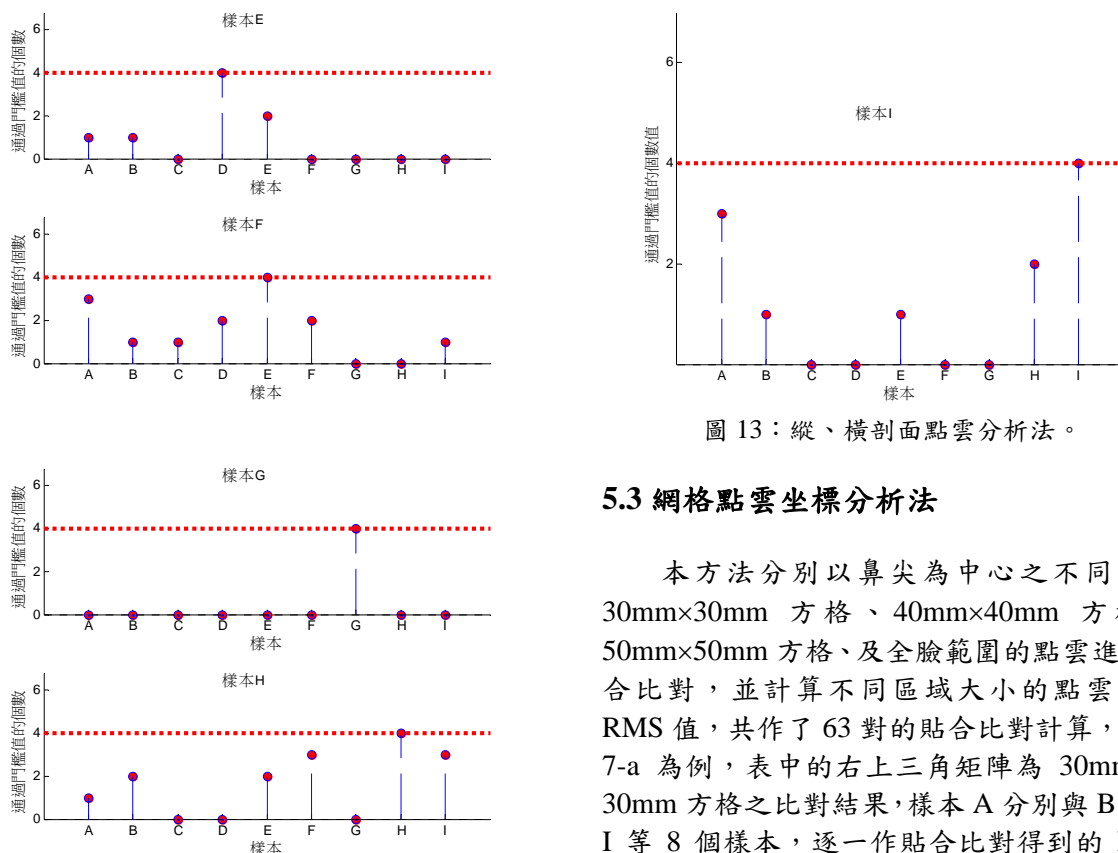


圖 13：縱、橫剖面點雲分析法。

### 5.3 網格點雲坐標分析法

本方法分別以鼻尖為中心之不同區域 30mm×30mm 方格、40mm×40mm 方格、50mm×50mm 方格、及全臉範圍的點雲進行貼合比對，並計算不同區域大小的點雲比對 RMS 值，共作了 63 對的貼合比對計算，以表 7-a 為例，表中的右上三角矩陣為 30mm 30mm 方格之比對結果，樣本 A 分別與 B、…、I 等 8 個樣本，逐一作貼合比對得到的 RMS 值，而左下三角矩陣則為 40mm×40mm 方格之比對結果；50mm×50mm 方格及全臉範圍之比對結果，如 7-b 表。

表 7. 網格點雲坐標分析法成果表(單位:mm)

a : 30mm×30mm 方格與 40mm×40mm 方格 RMS 值

		30mm×30mm 方格								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
40 m m × 40 m m 方 格	A	-	2.16	2.22	2.90	2.00	2.92	2.66	2.66	3.22
	B	2.98	-	2.47	2.68	2.11	2.89	2.40	2.78	3.19
	C	2.43	3.45	-	2.63	2.75	3.00	3.00	3.01	3.20
	D	2.68	2.52	2.59	-	2.60	2.75	3.25	3.20	3.00
	E	2.40	2.41	3.06	2.69	-	2.13	2.81	2.80	3.05
	F	2.57	2.74	3.68	3.57	2.47	-	3.08	3.03	3.15
	G	3.12	3.62	3.51	3.18	3.62	3.91	-	2.61	3.30
	H	3.98	3.86	2.86	3.30	2.88	3.27	2.62	-	3.28
	I	3.07	2.29	2.44	3.64	3.75	3.02	2.45	2.62	-

b : 50mm×50mm 方格與全臉範圍 RMS 值

		50mm×50mm 方格								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
全 臉 範 圍	A	-	3.13	4.59	4.17	4.78	4.94	3.58	4.72	5.91
	B	4.06	-	3.46	3.12	3.75	3.48	5.64	5.42	4.74
	C	6.32	6.58	-	5.89	4.74	5.25	4.51	5.41	4.67
	D	6.90	5.45	8.13	-	5.52	4.77	4.67	5.58	4.99
	E	7.47	5.77	4.24	6.45	-	3.59	3.28	4.84	7.16
	F	8.26	3.16	8.48	7.53	5.84	-	4.61	4.64	4.72
	G	3.86	8.70	7.52	5.17	6.69	7.90	-	3.77	3.94
	H	5.59	7.13	6.29	8.54	5.19	6.31	3.85	-	4.12
	I	7.15	4.24	5.93	5.49	8.90	7.58	6.13	7.83	-

由表 7 結果顯示，30mm×30mm 方格 RMS 值介於 2.20~3.30mm，而辨識為同 1 人的門檻值為 0.43mm，顯然 RMS 值均大於門檻值，表示可以區分出不同的樣本。此外，40mm×40mm 方格、50mm×50mm 方格、全臉範圍之 RMS 值分別介於 2.29~3.98 mm、3.12~7.16 mm、3.16~8.90 mm 區間，上述相對

應辨識為同一人的門檻值分別為 0.89 mm、1.04 mm、2.56 mm。相同地，它們各別 RMS 值也都大於各自的門檻值，表示可以區分出不同的樣本，本項方法的辨識率成功率為 100%。重新將表 7 整理如表 8 結果，若考量資料計算量，建議可採用資料量較少的 30mm×30mm 方格區域作貼合比對。

表 8. 網格點雲坐標分析法 RMS 表(單位：mm)

項目	RMS 值
30mm×30mm 方格	2.20~3.30
40mm×40mm 方格	2.29~3.98
50mm×50mm 方格	3.12~7.16
全臉範圍	3.16~8.90

## 六、結論與建議

研究結果表明點雲空間以跨鼻尖幾何貼合概念的人臉辨識可行，相較其它相關 3D 人臉辨識，本研究獲致以下成果：

- (1) 僅需以人臉鼻尖正面作人臉辨識免除 3D 人臉辨識三維建模繁雜運算負擔。
- (2) 採均方根誤差(RMS)作為門檻值，簡化了處理程序。

為了驗證本研究所提出的方法，以 Rapidform 3D 模型處理軟體內訂之 ICP 方法所得到的結果作比較，本研究以雷射掃描方式獲取資料，研究對象為成年年輕 4 男 5 女(年

紀約 22 歲)，採均方根誤差(RMS)作為門檻值，實驗結果顯示以 Rapidform(商用軟體)辨識成功率為 89%，本研究的縱、橫剖面線點雲分析法及網格點雲坐標分析法方法，可達到 100% 人臉辨識率。未來將繼續增加 3D 點雲人臉樣本數量，訂定合宜的各項特徵門檻值，及針對不同表情與帶眼鏡時的臉部變化，以本研究所建立的縱、橫剖面線點雲分析法及網格點雲坐標分析法，作進一步辨識研究。

## 參考文獻

- [1] Kevin W. Bowyer , Kyong Chang, Patrick Flynn, “A survey of approaches and challenges in 3D and multi-modal 3D + 2D face recognition”, *Computer Vision and Image Understanding* 101 , pp.1–15, ELSEVIER, 2006
- [2] Andrea F. Abate, Michele Nappi , Daniel Riccio, Gabriele Sabatino, “2D and 3D face recognition: A survey”, *Pattern Recognition Letters* 28 , pp.1885–1906, ELSEVIER, 2007
- [3] Kevin W. Bowyer , Kyong Chang, Patrick Flynn, “A survey of approaches and challenges in 3D and multi-modal 3D + 2D face recognition”, Vol. 101, pp.1-15, ELSEVIER, 2005
- [4] 鏡逸聰、黃雅軒、鄭勝文、蔡耀弘、趙鴻欣、吳正毅, “即時運算之人臉辨識系統”, *電腦與通訊*, 第 104 期, 第 70 -75 頁, 2003。
- [5] 梁振升, 以 Open CV 實現即時之人臉偵測與辨識系統, 銘傳大學電腦與通訊工程學系碩士班碩士論文, 臺北, 2010。
- [6] 駱榮欽、許秀貞, “A Face Tracking and Recognition Using AdaBoost and PCA Algorithm”, *臺北科技大學學報*, 第 44 卷, 第 1 期, 第 21-33 頁, 2011。
- [7] Farshid Hajati, Abolghasem A.Raie , Yongsheng Gao, “2.5D face recognition using Patch Geodesic Moments”, *Pattern Recognition*, Vol. 45, Issue 3, pp.969-982, ELSEVIER, 2012。
- [8] 吳政誼, 以主成份分析(PCA)作 3 維人臉辨識之研究, 逢甲大學環境資訊科技碩士學位學程碩士論文, 臺中, 2006。
- [9] 許智程, 以影像資訊輔助 3D 雷射掃描作人臉特徵資訊之建立, 逢甲大學環境資訊科技碩士學位學程碩士論文, 臺中, 2009。
- [10] Boris Efraty, Emil Bilgazyev, Shishir Shah, Ioannis A. Kakadiaris, “Profile-based 3D-aided face recognition”, *Pattern Recognition* Vol. 45 Issue 1, pp.43–53, ELSEVIER, 2012
- [11] 陳筠、張凱鈞、陳鴻智、洪本善, “人臉 3D 點雲辨識研究”, 第 31 屆測量及空間資訊研討會, 臺北, 2012。
- [12] <http://www.konicaminolta.com/instruments/products/3d/non-contact/vivid910/index.html>
- [13] <http://www.rapidform.com/2006>, INUS Technology inc.
- [14] Dalong Jiang, Yuxiao Hu, Shuicheng Yand, Lei Zhangc, Hongjiang Zhang,Wen Gao, “Efficient 3D reconstruction for face recognition”, *Pattern Recognition* 38 pp.787 – 798, ELSEVIER, 2005
- [15] Vanicek, P. and Krakiwsky E. J., Geodesy: The Concepts, p38, ISBN 0-444-86149-1, 1982.