



非接觸式3D感測量測系統

工業技術研究院／張晉嘉、李耀輝、許益嘉、陳易呈



一、前言

量測物件尺寸、公差等數據的方法，隨著時代的進步，從傳統的游標卡尺、量表、塊規、塞塊等量具，到三次元量測儀(Coordinate Measuring Machine, CMM)進行抽檢，一直發展到最先進的3D掃描量測系統，可以支援快速特徵全檢。三次元量測儀是透過探針得到工件特徵的點位座標數據，再利用有限的點數透過軟體運算得到尺寸數據。3D掃描量測系統所取得的是數位3D點雲資料，透過高精度特徵辨識軟體運算，可得到更高精度的尺寸公差數據，可廣泛應用在消費者、汽機車精密零組件、航太等領域。

高精度量測依據檢測方式的不同，可分為接觸式和非接觸式兩大類。接觸式是利用觸發式探頭，探測系統直接碰觸工件來進行量測；非接觸式則是利用光學感測元件與影像處理系統為主，在沒有與工件接觸下進行3D量測。3D量測相較傳統的檢測方法，可有效提升量測作業的重複性與再現性(Repeatability and Reproducibility, R&R [1][2])，量測系統不僅有高品質的穩定精度，且不易因作業人員的操作而有量測結果上的差異。而採用非接觸式量測，更具有量測速度快、量測範圍大等優勢，因此在工業上廣泛的應用於航太、汽車、機車、精密產業、科技產業。

建構一套3D感測量測系統須從應用需求、

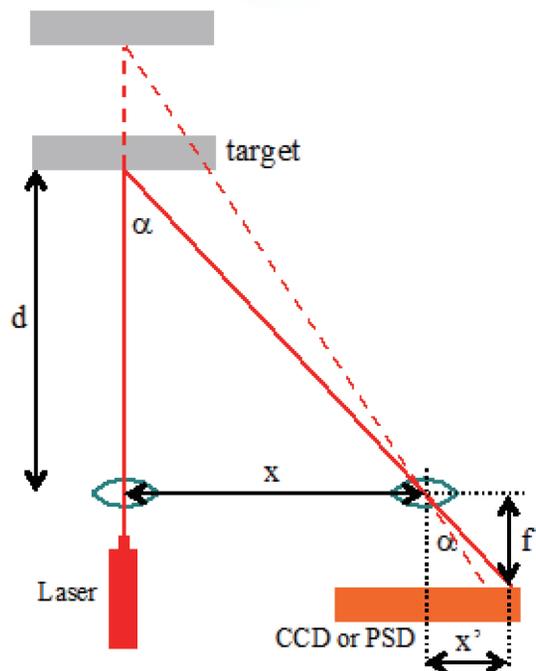
量測精度等需求角度切入，其硬體組成要件主要包含有非接觸式3D感測器、測座與運動平台載具等子系統，軟體要件則需負責巨量點雲之幾何特徵辨識與檢測運算。

二、非接觸式3D感測器

市面上已有許多採用非接觸式光學感測器之3D感測量測技術，其中以2D相機應用在工業等級的方法主要有：

1. 雷射三角量測 (Laser Triangulation)

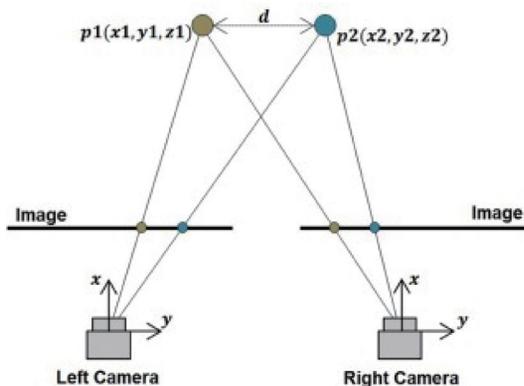
利用雷射光束在目標物上產生擴散反射，由2D相機運用三角量測原理進行3D量測。



資料來源：Slawomir S. Piatek [3]

2. 立體視覺量測(Stereo Imaging)

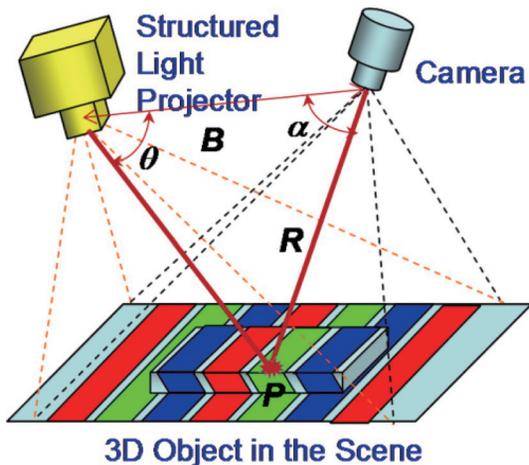
應用2個2D相機，仿人體雙眼構造產生立體影像，運用視差原理進行3D量測。



資料來源：J.C.Rodríguez-Quiñonez [4]

3. 結構光量測(Structured Light)

利用結構光投射目標物產生光條紋，再透過投射的光紋形狀變化，由2D相機來計算形狀和距離進行測量。



資料來源：Jason Geng [5]

本文以雷射三角量測原理說明，典型的雷射3D量測是採用「三角測距法」(Triangulation)，其原理是基本幾何學的應

用，利用兩點已知位置來求得第三點距離的方法，此基本原理最早被應用在傳統大地測量領域，其時間已相當久遠，過程當中技術一直不斷地演進，應用在工業領域使用設備與元件的性能也不斷地提升，連帶量測精度也同步提高。

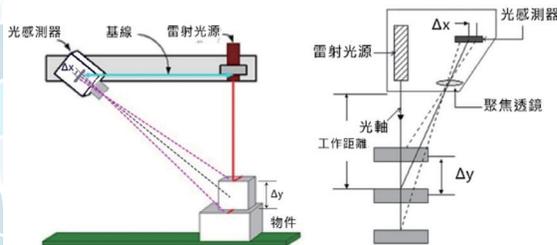
雷射三角量測Laser triangulation

雷射光源掃描方式是目目前光學3D量測方式中經常被使用的量測方法。由於雷射光束的穩定且收斂的特性，經由光源投射於待測物表面，此雷射光沿著待測物表面形成一條剖線，此剖線即為雷射光與待測物表面在3D空間上的交線，因此充分代表待測物表面的3D幾何形狀。接著使光學感測器能夠精確地感測雷射線投射在待測物表面上的剖線資料，只要能由感測器分析出此剖線的成像資訊，亦即可分析出待測物在此雷射投射區的深度資訊，精確地計算出整條剖線的3D座標。

如何由光學感測器成像資訊計算出待測物深度？以下圖簡易的雷射光源與感測器結構為例，雷射光束投射在任一表面產生光點，部分的雷射光自表面上散射或反射，然後經過透鏡的聚焦後投影於光學感測器上。若此待測表面作上下 Δy 的位移量，則光點沿著雷射光束的路徑方向移動，也造成光學感測器上的光點會伴隨產生 Δx 的位移，其中 Δy 與 Δx 成正比。藉由三角量測法，由投影點光源經透鏡至待測物表面所形成之三角關係，以計算出待測物與光源的距離。也就是在感測元件上成像的位置之位移量與測物表面距離位置變化成比例關係，因此由感測元件上成像的位置之距離，可估測出待測物表面位移變化量，即深度資訊。

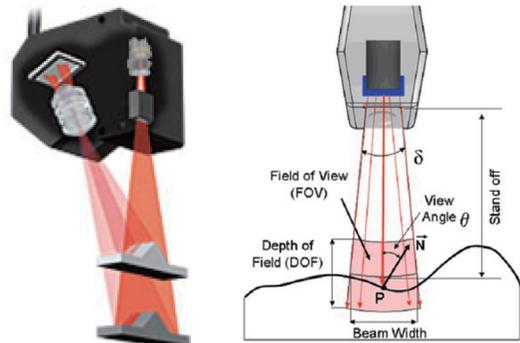


深度再結合像平面之2D空間資訊，可計算出光點之3D座標。



雷射三角量測原理

實務上，線形雷射光源依不同用途其波長約從可見光(635nm)至近紅外光(780nm)的範圍，另外也有採用藍光雷射，波長約400~450 nm範圍，其受光密度提高，能更進一步確保光強度。透過柱面物鏡將雷射光束擴大為條狀，投射出單波長雷射平面光在待測物體表面，並呈現一條雷射曲線，隨後雷射在待測物上產生擴散反射，使反射光束能聚焦在光學感測器元件上成像，生成穩定的高精度輪廓。經過三角量測計算該雷射剖線的3D點群座標。若經過連續運動掃描所得到多條雷射剖線的3D點群座標，便可以進一步建立整個待測物的3D模型。

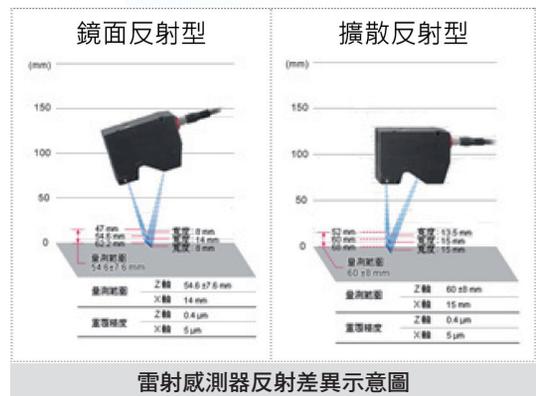


雷射三角量測原理

再進一步了解非接觸式雷射三角量測感測器，依使用條件又可細分二種作用方式：

1. 光反射式原理 (Light Reflection Principle)，適用在當工件表面粗糙度較光滑的情況，具有良好的反射效果。
2. 光散射式原理 (Light Scattering Principle)，適用在當工件表面具有一定粗糙度的情況，才能滿足其散射狀態。

下圖是試舉市售二款不同原理之感測器，針對不同表面特性配合不同量測策略，其產品設計的對應規格。

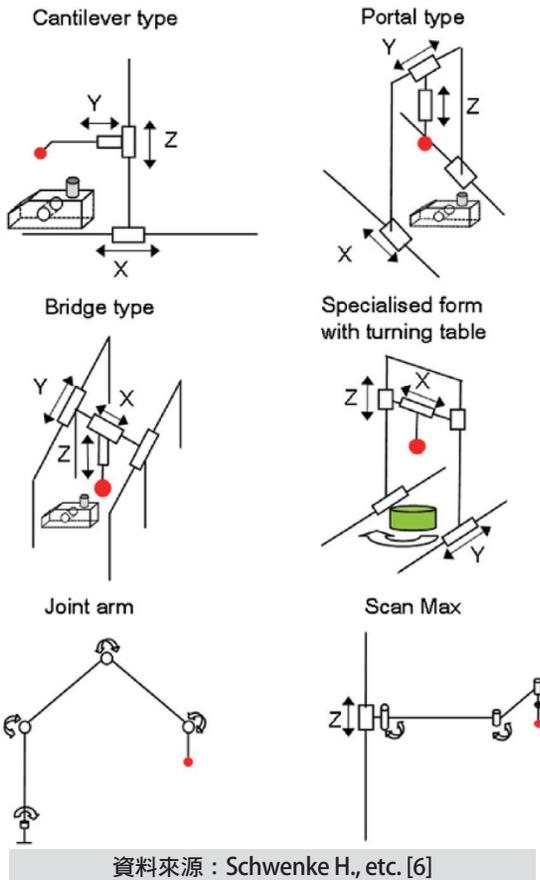


雷射感測器反射差異示意圖

三、掃描運動平台載具

使用非接觸式3D感測器進行連續掃描，可以得到待測物的3D數位特徵，則須將感測器建構在運動平台載具上。而運動平台需具備足夠的自由度，來滿足其工作需求，因此發展出各式各樣的串聯式運動平台，串聯式平台其運動機構係由機件與其軸向組合設計決定，一些較常見之運動機構的種類，Schwenke H.[6]以簡化地抽象表示，如下圖所示其運動鏈標示有其機件軸向、工件、工具與機台之相對運動方向。延著其運動鏈移動或轉動，可估算其鏈末

端之位置及姿態，運動鏈串聯的方式，以此原理推論，可以推導出運動最後工具中心點(Tool Center Point, TCP)之位置及姿態。



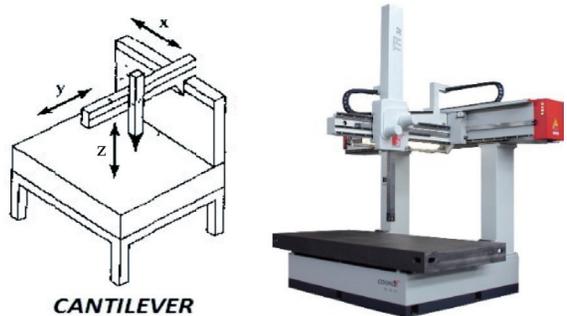
資料來源：Schwenke H., etc. [6]

評估要搭載感測器所需之掃描運動平台載具，就要考量掃描工件待測物的尺寸、類型和精度要求，以及掃描所需的自由度、掃描行程等，以利選定適合的機台結構形式。以下針對幾種適合搭載感測器之串聯式平台分類介紹：

1. 懸臂式 (Cantilever type)

懸臂型式原則是針對中、小工作範圍需求設計，其各運動鏈串聯方式為感測器探頭裝在水平懸臂支柱(Z)上，支柱沿水平懸臂樑Y軸

方向移動，整個水平懸臂樑、柱沿水平面的導槽在x軸方向移動。此型式有三邊開放空間，有易於工件的裝卸，但因懸臂因素，不適合載重感測器探頭過重。其結構如下圖所示。

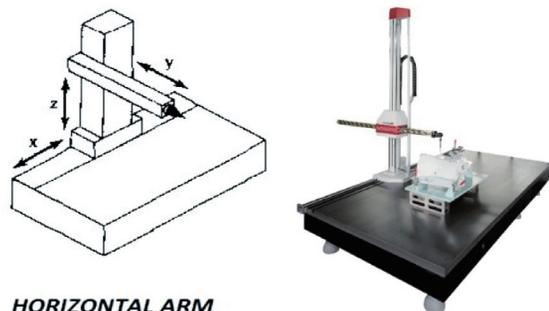


CANTILEVER

資料來源：Coord3 Industries S.r.l.

2. 水平懸臂式 (Horizontal Arm type)

水平懸臂型式如同Cantilever type X軸運動，但感測器探頭裝在水平懸臂(Y)上，水平懸臂(Y)再結合在支柱(Z)上，總成沿水平面導槽在x軸方向移動。因懸臂因素，在應用高精度之量測時，應在水平臂在伸出或收回時，對重量而造成的誤差進行補償。其結構如下圖所示。



HORIZONTAL ARM

資料來源：Coord3 Industries S.r.l.

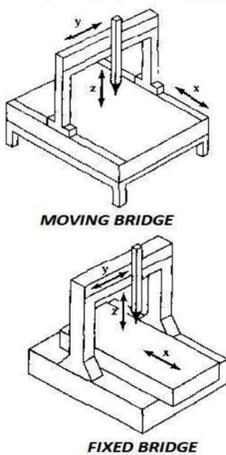
3. 橋架式 (Moving Bridge type, Fixed Bridge type)

可分移動橋式(Moving Bridge)、固定橋式(Fixed Bridge)搭配移動桌台(Movingtable)或旋轉



桌台(Rotary table)。平台原則設計沿著相互正交的導軌而運動，裝有感測器探頭的Z軸部分裝在Y軸部分上，並相對其作垂直運動。Y軸和Z軸部分的總成相對X軸部分或桌台運動。

橋架式結構如下圖所示，水平樑垂直Z軸且被兩支柱支撐於兩端，樑與支柱形成“橋架”，可沿著Y方向移動。因水平樑兩端有支柱支撐，可得最小撓度，相較懸臂式有更高的精度。橋架式平台具有開敞空間性、結構剛性佳等優點，是中小型測量機台的主流機型。



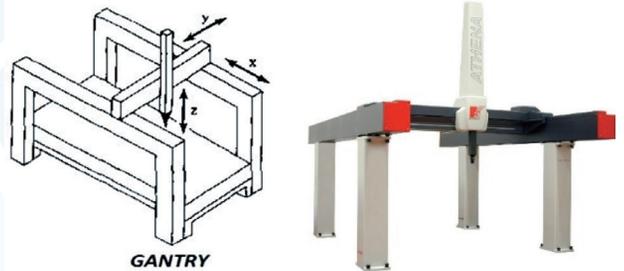
資料來源：Coord3 Industries S.r.l.

4. 龍門式 (Gantry type)

龍門式與橋架式相較，其支架是多直接固定在地板上，故又稱為門型。平台原則設計沿著相互正交的導軌而運動，裝有感測器探頭的Z軸部分裝在Y軸部分上，並相對其作垂直運動。Y軸和Z軸部分的總成相對X軸部分運動，X軸部分在機座兩側的導軌上作水平運動，由機座或地面承載工件。龍門式結構如下圖所示。

龍門式一般為大中型測量機，要求較好的地基，立柱影響操作的開闊性，但減少了移動部分品質，有利於精度及動態性能的提高，龍

門式平台由於其剛性較懸臂式要好得多，對大尺寸工件的測量而言具有足夠的精度。

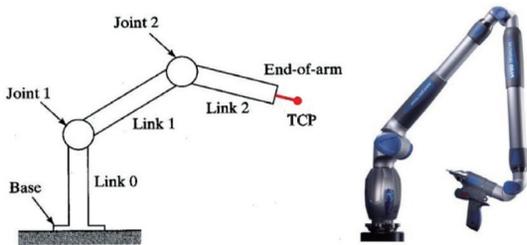


資料來源：Coord3 Industries S.r.l.

5. 機械手臂式 (Joint Arm type)

上述正交性串聯平台與機械手臂式主要差別在於多關節連結之設計，這樣的功能使機械手臂可以在三度空間任意移動，做到高階非線性運動，而這正是前者無法相比之處。機械手臂機構是由底座(Base)、多個機械臂(Link)與關節(Joint)所組成，平面機械手臂僅需要三個自由度，而工作於三度空間的機械手臂則需要六個以上的自由度。以下面機械手臂式結構簡圖所示，有三個關節的轉動軸，其中一個機械臂連桿是裝在基座上能繞基座旋轉，另兩個機械臂連桿的運動型態，透過關節轉動軸就如同鉸鍊間兩連桿能做相對的轉動。

機械手臂的剛性直接影響到動作的平穩性、運動的速度和定位精度。然而剛性好、載重大，結構往往粗大、機械臂連桿也多，增加手臂自重；轉動慣量增加，衝擊力就大，位置精度就低。因此，依需求選用機械手臂平台時，須根據所需感測器探頭載重、自由度數、工作範圍、運動速度及機械手的整體佈局和工作條件等各種因素綜合考慮。

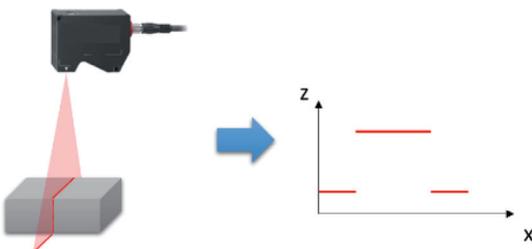


資料來源：FARO Technologies, Inc.

四、全域3D點雲量測系統整合

在完成硬體層設置後，就可利用掃描運動平台搭載感測器進行運動掃描，要特別注意的是非接觸感測器的掃描資料所描述的是：在掃描當下以工具中心點(TCP)的位置、姿態所獲取之感測器之區域座標系統框架下之點集合。因此，將不同掃描運動位置之感測器之區域座標整合，重建在統一之全域座標系統框架下，即軟體層3D點雲重建技術之首要任務。

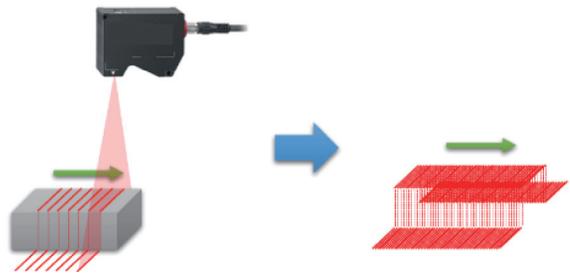
以線雷射掃描感測器為例，採用之雷射掃描感測器所獲取的資料主要為感測器距離待測物表面的深度距離資訊(Z)，結合每個掃描點在像平面之X-Y資訊，為雷射掃描區域座標框架下之(X-Y-Z)坐標。另因線型雷射線，其Y值恆固定，亦可視掃描線(profile)為X-Z二維空間的資料陣列，如下圖所示。



雷射感測器擷取之二維資料示意圖

則當檢測機台進行一線性運動掃描待測物時，雷射感測器所擷取的掃描線(profile)與機台

運動同步每一個觸發的位置資訊重新建構於全域座標系統框架下之三維空間中，形成一3D的點雲資料。



感測器搭配運動同步建構3D點雲示意圖

實務上，雷射感測器的掃描感測範圍通常無法一次性涵蓋待測物的寬度，甚至有遮蔽的影響無法以固定角度進行掃描，因此需要3D掃描路徑演算法的開發來進行多次且有效的掃描，以獲得待測物每一個面向的輪廓點雲資料，如下圖所示，根據掃描路徑的決定將會產生許多的點雲群。因此，建構一全域的點雲資料，除了需要同步運動的位置資訊之外，還需針對雷射感測頭的掃描姿態進行同步轉換，方能獲得系統一致的點雲資料，完成建構成全域的3D模型。

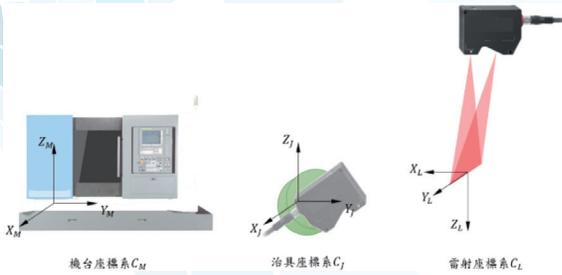


多面向掃描的多區塊點雲群示意圖

掃描的運動位置、姿態與掃描線重建流程，必需透過一轉換函式來進行運算。首先，針對掃描系統進行各座標系的定義，包含了機台座標系 C_M 、治具座標系 C_J 以及雷射座標系 C_L 。座標系之間轉換目的在於將雷射感測器所



量到的二維資料(建立於雷射座標系)，配合平移運動和旋轉運動的資訊，重新建構基於機台座標系的3D點雲資料。若未經過正確的轉換函式運算，雷射感測器所掃描的資料將會無法建構於正確的空間位置，多個點雲群之間的關係將會無法正確地彼此連結。



各座標系之定義示意圖

因應全域點雲資料的擷取，雷射感測器安裝於一治具上，經由控制該治具的旋轉來改變雷射感測器的姿態，針對工件外形的輪廓狀況來進行掃描。因此，轉換的關係由雷射座標系、治具座標系至機台座標系的示意圖如下圖所示。雷射座標系與治具座標系之間的轉換關係式為 T_L^J ，治具座標系至機台座標系之間的轉換關係式為 T_J^M ，其轉換關係式為一4x4的轉換矩陣，包含了座標系之間的平移與旋轉元素，如式(1)與式(2)所示。在雷射座標系下所量測到的點資料 P_L ，經由完整轉換後獲得全域式的點雲資料 P_M 轉換關係如式(3)所示。

$$T_L^J = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ q_{1 \times 3}^T & s_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rotation & translation \\ perspective & scale \end{bmatrix} \quad \text{式(1)}$$

$$T_J^M = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ q_{1 \times 3}^T & s_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rotation & translation \\ perspective & scale \end{bmatrix} \quad \text{式(2)}$$

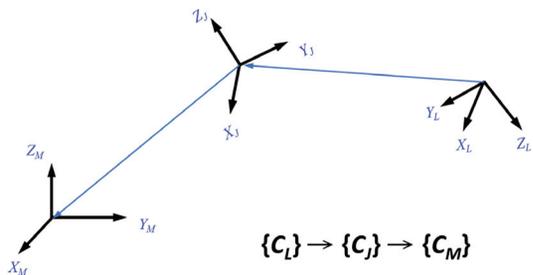
$$P_M = T_J^M T_L^J P_L \quad \text{式(3)}$$

系統試驗-3D點雲GD&T檢測

上述所描述的雷射3D量測系統已實際應用於以汽車輪圈產品檢測上，所採用的掃描運動平台載具是採用懸臂式(Cantilever type)，搭載非接觸式雷射3D感測器，透過不同位置、姿態進行運動觸發雷射掃描，再由軟體3D點雲重建後，可得到全域的輪廓點雲資料，如下圖所示。



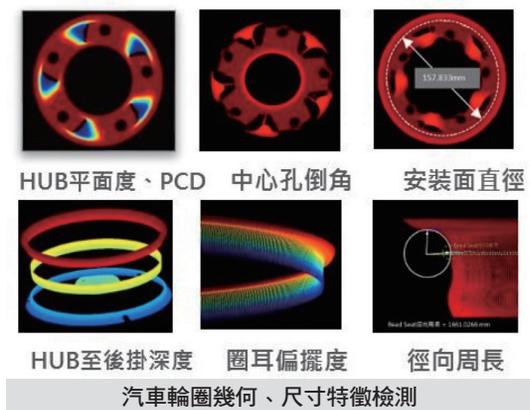
汽車輪圈掃描量測



各座標系之間的轉換關係示意圖

有了全域的3D輪廓點雲資料，可進行各式各樣的幾何尺寸與公差(Geometric dimensioning and tolerancing, GD&T)的後處理特徵分析。下圖為輪圈3D點雲資料，各局部可分析平面部分的平面度、鋁圈中心孔徑尺寸、

安裝面直徑尺寸等；而不同局部地方點雲，亦因受惠於點雲全域處理後，可輕鬆地相互計算特徵尺寸，例如安裝面(平面)至後掛面(平面)間之深度。



五、結語

非接觸量測系統是集合機械控制、機構設計、光學感測及軟體演算法等領域技術，所量測產生的全域3D點雲資料應用範圍相當廣泛，例如3D建模、檢測及逆向工程等；尤其是在精密加工產業上的檢測，各式各樣加工件半成品或成品之尺寸、幾何尺寸與公差（如長度、寬度、高度、厚度、弧度、距離、真圓度、真直度及平行度等），亦或是表面瑕疵觀察、不良品篩檢分析等作業，皆有助於提升產線出貨品檢的效率。

總結來說，非接觸式雷射量測系統具有獨特之功能優勢，在感測掃描上，適用於高反

射金屬表面及具彈性表面產品的量測；在量測運動上，可支援即時掃描擷取，實現形狀、方向、定位、偏轉度等快速3D量測；此外，基於系統支援全區域多點的量測，可重建全域之3D點雲，適合滿足各種GD&T檢測需求，可取代品檢作業之客製化檢具，因應加工產線彈性換線需求。

☒ 參考文獻

- [1] Michael Mock, 2013, Contact vs. Noncontact Measurement for Computer-Aided Inspection, Quality Magazine, (June 2013), p. 36-41
- [2] Larry B. Barrentine, 2003, Concepts for R&R Studies, ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin.
- [3] Slawomir S. Piatek, 2015, Measuring distance with light, Hamamatsu
- [4] J.C.Rodríguez-Quiñonez, O.Sergiyenko, W.Flores-Fuentes, M.Rivas-lopez, D.Hernandez-Balbuena, R.RascónaP. Mercorellic,2017, Improve a 3D distance measurement accuracy in stereo vision systems using optimization methods' approach, Opto-Electronics Review, Volume 25, Issue 1, May 2017, Pages 24-32
- [5] Jason Geng,2011, Structured-light 3D surface imaging: a tutorial, Advances in Optics and Photonics Vol. 3, Issue 2, pp. 128-160 (2011)
- [6] Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F., 2008, Geometric error measurement and compensation of machines—Anupdate, CIRP Annals -Manufacturing Technology, vol.57, pp. 660–675