

逆向工程概論

(Reverse Engineering Introduction)

教課書：逆向工程技術與系統

全華圖書公司 (02) 2507-1300

編著：章明、姚宏宗、鄭正元、

林辰生、姚文隆

書號：05653

參考資料：(1)投影片、講義教材

(2)逆向工程 Imageware 功能剖析

(莊峻超編著 全華圖書 書號 05339007)

授課教師：藍翔耀

Office：復華樓 4 樓 B406 室

網址：<http://cc.cust.edu.tw/~lan>

E-mail：lan@cc.cust.edu.tw

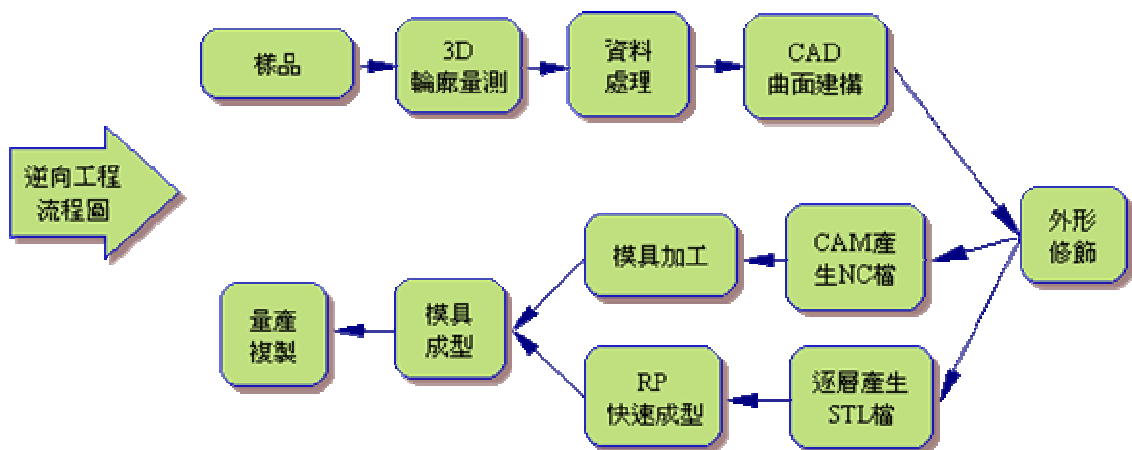
成績計算：期中考 30 %

期末考 30 %

報告 40 %

逆向工程簡介

逆向工程通常是以專案方式執行一模型的仿製工作。往往一件擬製作的產品沒有原始設計圖檔，而是委託單位交付一件樣品或模型，如木鞋模、高爾夫球頭，請製作單位複製（Copy）出來。傳統的複製方法是用立體雕刻機或液壓三次元靠模銑床製作出一比一成等比例的模具，再進行量產。這種方法屬稱類比式（Analog type）複製，無法建立工件尺寸圖檔，也無法做任何的外形修改，已漸漸為新型式數位化的逆向工程系統所取代。目前所稱的逆向工程是針對一現有工件（樣品或模型）利用 3D 數位化量測儀器準確、快速的將輪廓劃座標量得，並加以建構曲面、編輯、修改後，傳至一般的 CAD/CAM 系統，再由 CAM 所產生刀具的 NC 加工路徑送至 CNC 加工機製作所需模具，或者送到快速成型機（Rapid Prototyping）將樣品模型製作出來，此一流程稱為逆向工程。



逆向工程流程圖

其概略步驟如下：

1. 利用 3D 數位化量測儀器準確、快速的將**輪廓座標量得**。

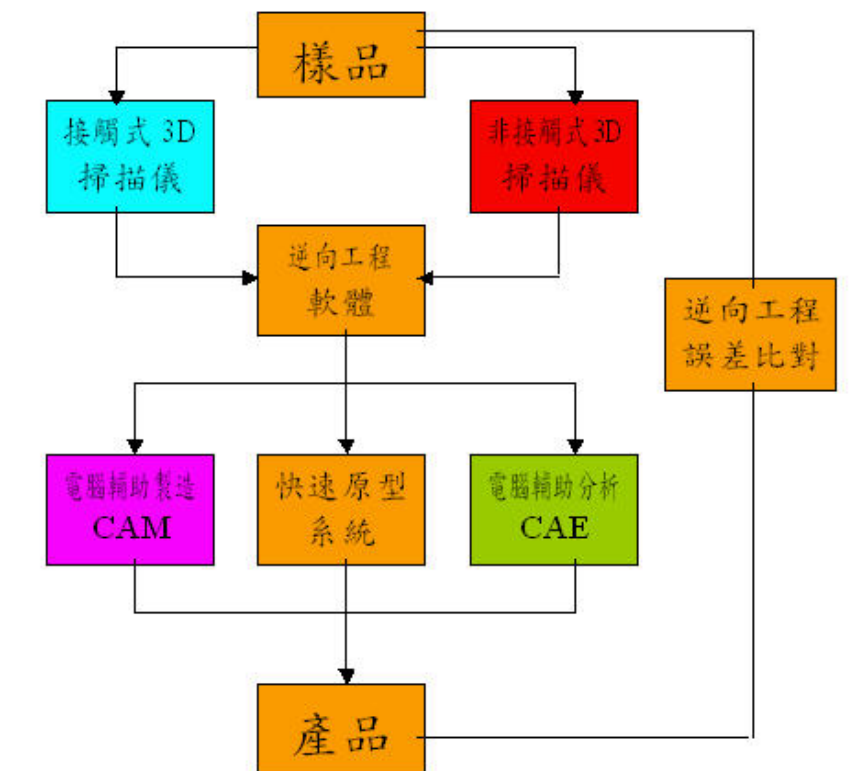
2. 加以**建構曲面**，並建立 3D Model。

- (1)量測點前處理
- (2)座標系統重整
- (3)曲線擬合
- (4)曲面擬合
- (5)量測誤差分析
- (6)逆向工程 CAD 技術
- (7) CAD 資料介面技術

3. 編修模型

所建立的 CAD 模型必須與現有的 CAD \ CAM 系統整合，可作為後續工程分析、產品設計或製造使用。

4. 將編修後的模型檔案，傳至一般 CAD\CAM 系統，經由 CAM 所產生刀具的 NC 加工路徑送至 **CNC 加工機**，製作**模具**；或者將圖檔傳檔至切層軟體處理，使用**快速原型機(RP)**製作**快速模型**，以減少製作模具所花費的時間。

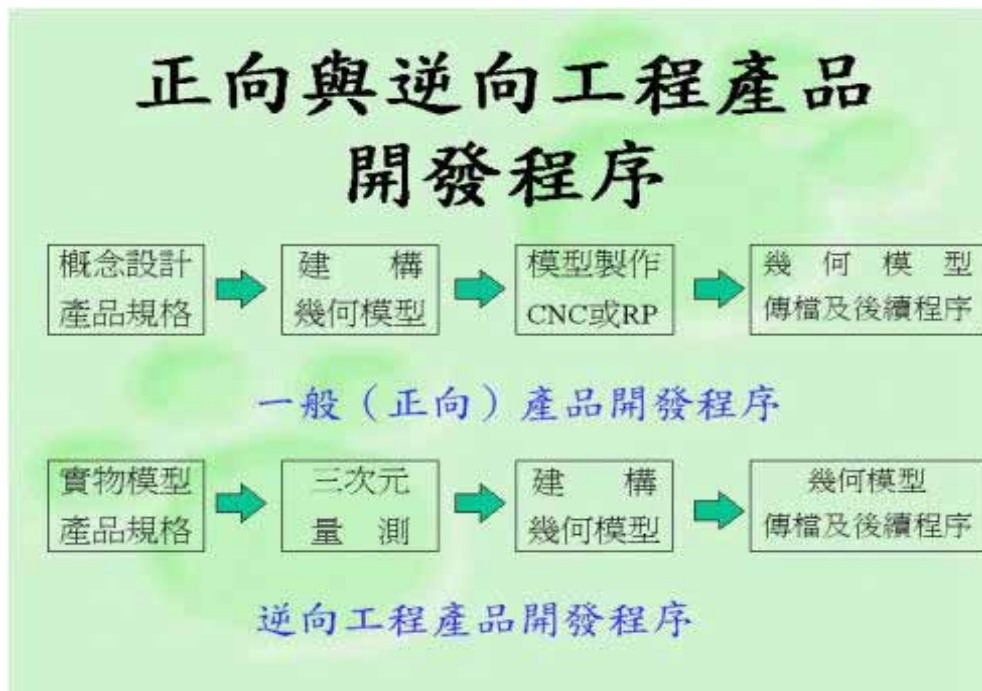


一、順向工程 (Forward Engineering) FE

1. 傳統正向工程
2. 流程：工業造形設計 > 電腦輔助設計 (CAD) > 模型製作 > 模具設計 > 模具製作 > 產品加工

二、逆向工程 (Reverse Engineering) RE

1. 逆向工程顧名思義，就是反其道而行，先有產品或樣品，以量測系統測出數據資料，進入專業處理軟體或 CAD/CAM 作後處理，再進入快速成型系統或直接進入數控工具機作生產加工。
2. 流程：樣品 > 3D 輪廓量測 > 資料管理 > CAD 曲面建構 > 模型製作 > 模具設計 > 模具製作 > 產品加工

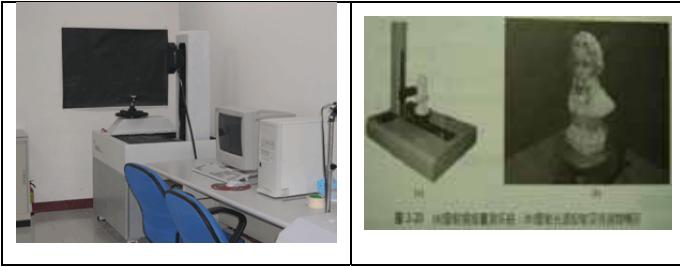


三、同步工程 (Concurrent Engineering) CE

同時整合快速原型(RP)、快速模具(RT)之配合、工程分析(CAE)之輔助，和 CNC 數控工具機之加工等整合，以加速產品開發上市，降低成本。

硬體---量測系統

四軸雷射掃描(非接觸式量測)



採用雷射光帶掃描，一秒鐘可以掃描 6000 點，獨特的第四軸旋轉軸，可以一次量取全部的點資料

三次元座標量測儀 (接觸式量測)

(Coordinate Measuring Machine, CMM 量測)



Portable 可攜式 3D 掃描器(非接觸式量測)



可攜式 3D 掃描器設計原理是利用雷射光投射於物體上，取得 CCD 上反射影像，經由三維座標計算，可快速量測物體表面的 3D 形狀，掃描測頭可以手握或置於三腳架，如同拍照的方式，從

不同角度方位對物體不同部位掃描，最後由軟體 (TRID) 對位整合成一筆完整的 3D 外形資料，特點是精度高，掃描速度快。

3D 光學掃描(照相)系統(非接觸式量測)



使用 ATOS (Advanced TOpometric Sensor) 光學式的量測系統，可以對物體作一快速且高解析度的點群量測。每單一筆量測可取得 40 萬或 130

萬的點數據(依測頭的解析度而有所不同)。而對於同一物體的數筆量測可以整合成一個 project(多筆量測的集合)，並輸出成點群資料，斷面點群資料，三角網格面的資料型式。

ATOS at work

硬體--- 加工機器

五軸加工機



車銑複合機(MC)

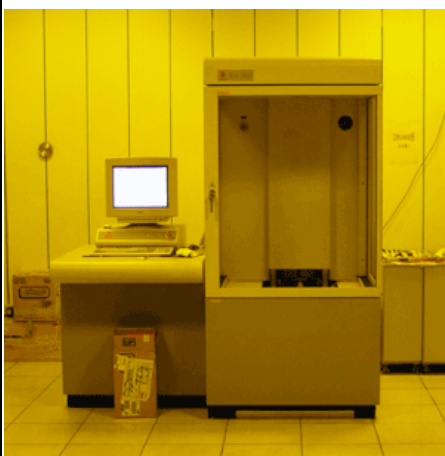


快速成型加工(Rapid Prototyping, RP)

RP 成形室



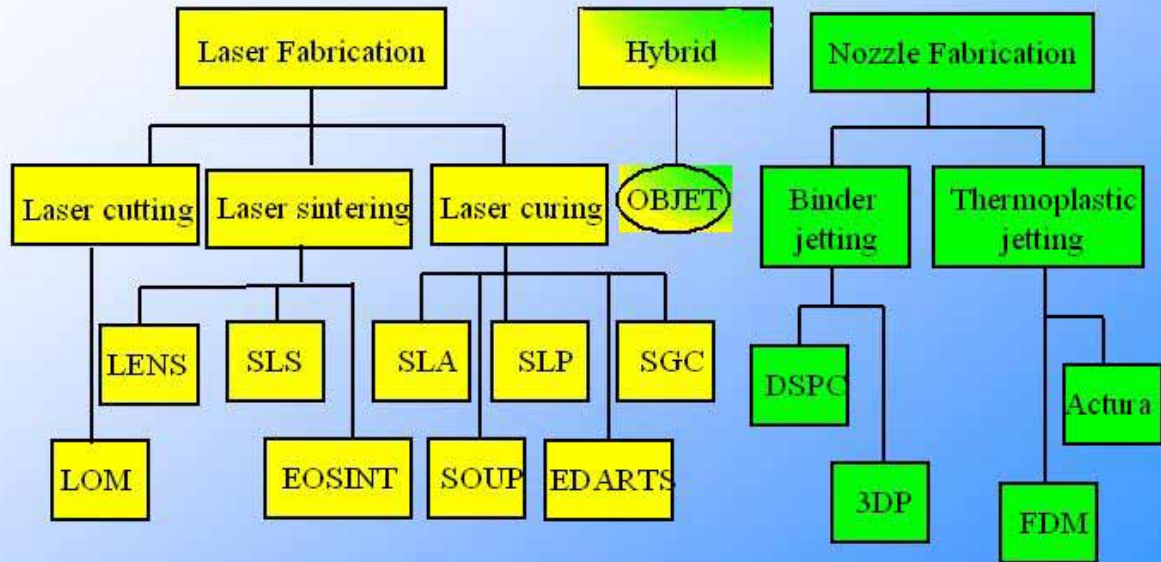
SLA3500



SLA7000



Commercial RP Systems



H. Y. Lan

5

軟體方面

使用 Surfacar、CATIA、I-deas、Pro/Engineer、SolidWorks、Imageware、geomagic studio 等視窗產品設計系統，從概念設計到生產成品，廣泛的運用在機械設備設計、高科技電子業、鈹金設計與製造、汽車及摩托車、航空航太領域、汽機車零件、醫療器材、運動器材以及消費性市場等產業。其概略步驟如下：

- (1)量測點前處理
- (2)座標系統重整
- (3)曲線擬合
- (4)曲面擬合
- (5)量測誤差分析
- (6)逆向工程 CAD 技術
- (7) CAD 資料介面技術

三次元量測

- 一次元量測：游標卡尺、分厘卡等只能作直線方向長度量測，僅具一次元量測功能。
- 二次元量測：投影機、工具顯微鏡因只作單純輪廓斷面形狀 XY 軸方向量測具有二次元量測功能。
- 三次元量測：而若是欲求得複雜輪廓形狀的精確尺寸，非得借重具有三次元量測的功能才行。

三次元是表示一個物體的尺寸，即為長、寬、高，而可以三個方向同時測量，具有三次元測量功能的是三次元量測儀，即做座標量測（Coordinate Measuring Machine，CMM），常使用於逆向工程的是屬於移動橋架型。

CMM是利用設置在Z軸的探測器（Probe），在互相垂直的X、Y、Z三軸向所組成的空間內移動，以接觸式或非接觸式探頭，配合三軸位移量測系統（光學尺），電腦軟體系統計算出各點，因此CMM是具有三度空間的量測系統，故又稱三次元量測儀。

三次元量測儀、量測儀探頭

量測儀探頭的規格型式，影響曲面資料的精確性，所以選擇適當的探頭規格方能得到最佳的量測資料。而就操作上偏向自動化，因此以傳統靠模作業為主的模具業，又有新的發展空間。

三次元量測儀(Coordinate Measuring Machine, CMM)所使用的以接觸式觸發探頭為主，但此類探頭使用上仍有許多限制，自雷射探頭問世後，解決了許多接觸式觸發探頭的限制條件，曲面量測在速度也大幅提升。

量測的感測方式分為接觸式與非接觸式，接觸式量測範圍較大，其精度也較高，但是速度慢，非接觸式量測速度快，但其範圍精度較小，兩種感測方式各有優缺點。

● 接觸式量測

- 優點：**
1. 量測範圍較大、準確性高。
 2. 不受工件表面反光影響。
 3. 適合一般幾何形狀量測。

缺點：

1. 因工件形狀不同，需要不同的夾治具，故成本高。
2. 接觸式探頭因磨耗需經常校正。
3. 使用不當或人為失誤造成工件部分精度誤差。
4. 量測速度慢。
5. 內部量測有所限制。
6. 所量測的點資料是探頭的中心點，故必須做球頭半徑補正。
7. 接觸力大小會影響量測結果。
8. 機器結構設計不良，會使量測結果產生誤差。

不同塗層顏色對雷射探頭量測不確定度的影響

- (1) 均勻噴塗金黃色、銀色、綠色、藍色及黑色等顏色漆，會導致雷射探頭量測不確定度更差或無法量測。
- (2) 均勻噴塗白色、灰色、黃色、橙色及紅色等顏色漆，會導致雷射探頭量測不確定度獲得良好改善。
- (3) 紅光雷射：絕不可用藍色、綠色、黑色漆。
- (4) 公司原廠建議用灰色漆；可用黃色、橙色及紅色等顏色漆來代替(如第二項所示)。

雷射探頭對不同斜度量測不確定度的影響

- (1) 工件表面的斜度越大，量測不確定度也相對增加。
- (2) 工件表面的斜度越小，表面的量測越佳，當角度超過 60 度時，雷射誤差相當大，故不能做量。

雷射探頭半徑補正

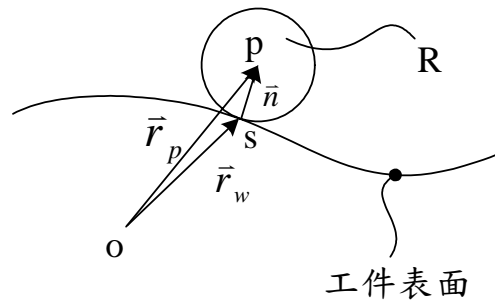
(1)符號 \vec{r}_p : 探頭中心之位置向量(實際測量所得之值, 已知值)

\vec{r}_w : 工件表面之位置向量(未知數)

\vec{n} : 單位法向量(已知值)

R : 探頭半徑(已知值)

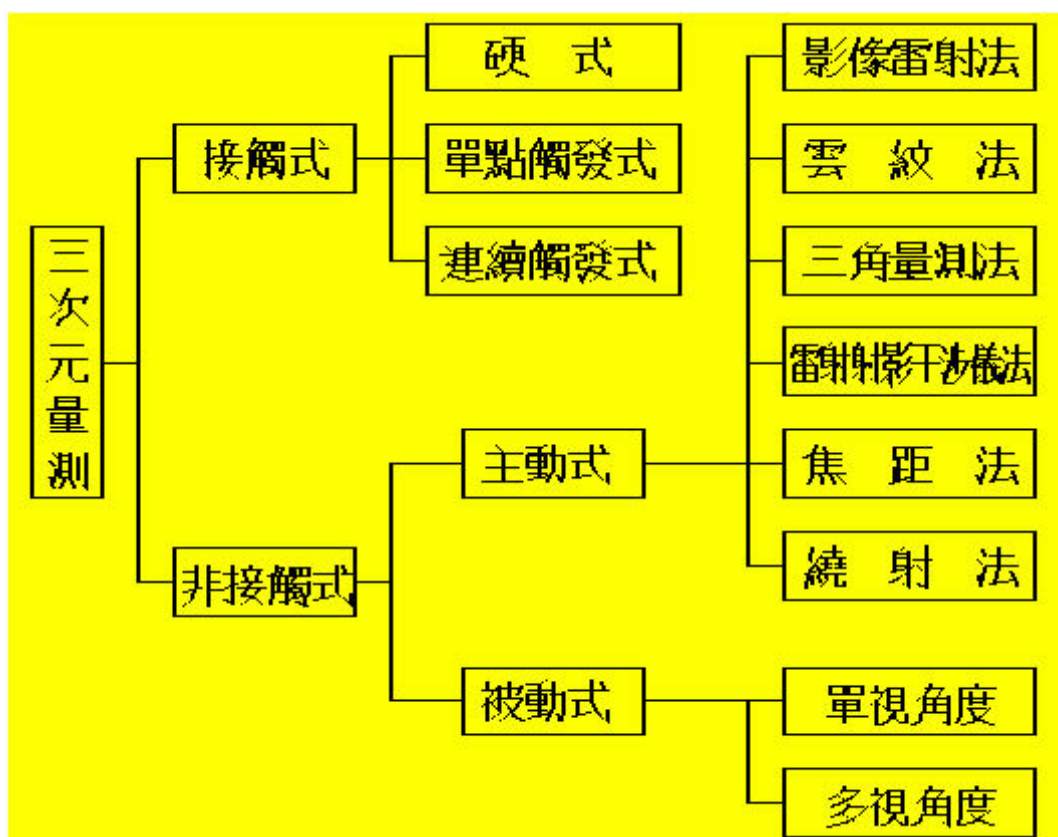
(2)公式 : $\vec{r}_p = \vec{r}_w + \vec{n} \cdot R \Rightarrow \vec{r}_w = \vec{r}_p - \vec{n} \cdot R$ (工件表面之位置向量可求得)



● 非接觸式量測

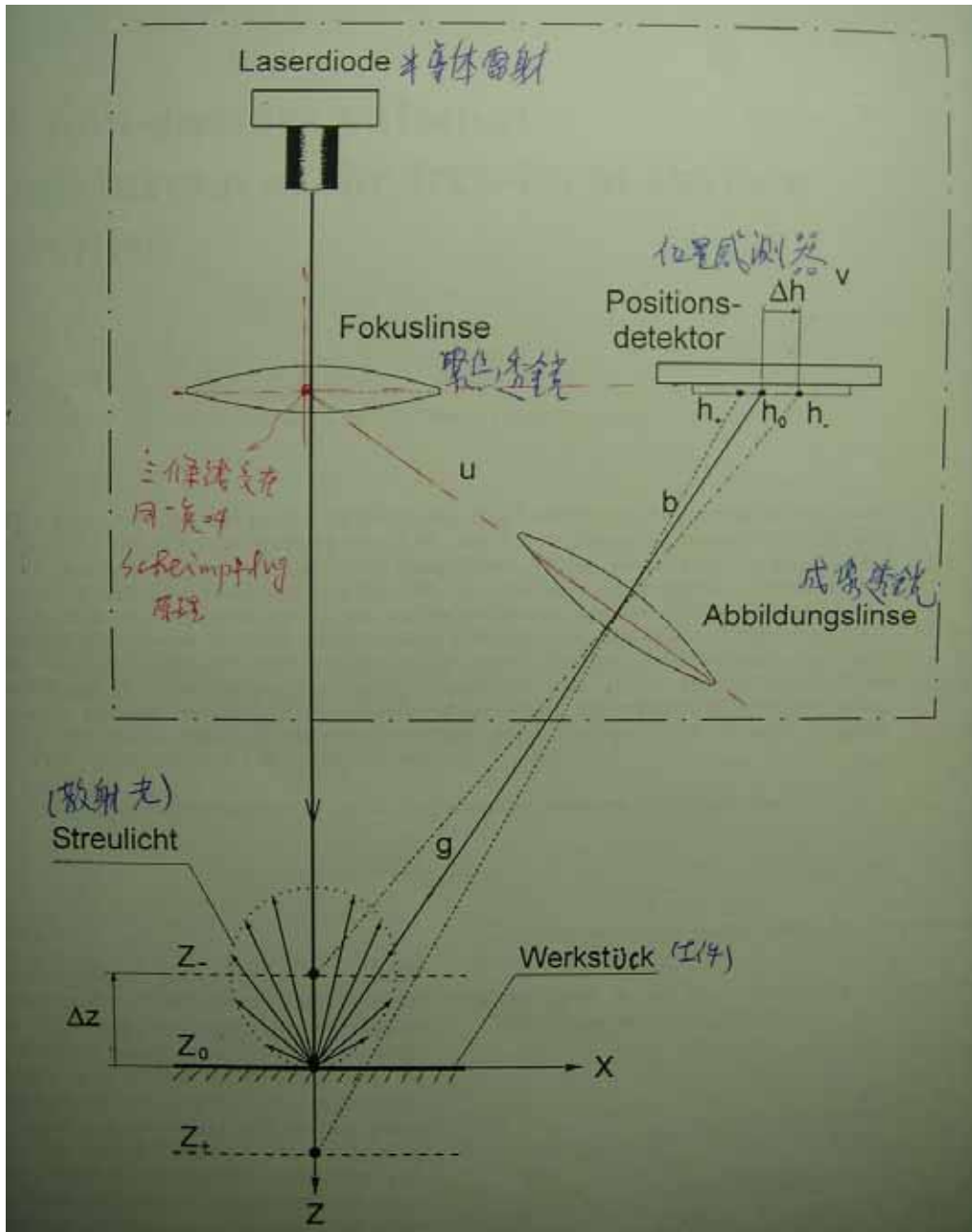
- 優點：
1. 無接觸壓力。
 2. 無探頭補正問題。
 3. 量測速率高。

- 缺點：
1. 待測物工件表面的明暗度會影響量測的精度。
 2. 量測範圍較小、量測精度較差。
 3. 陡峭面不易量測，雷射光無法照射到的地方就無法進行量測。
 4. 不易做座標定位，所以立體工件較難量測。



雷射探頭三角量測原理(Principle of triangulation laser probe) :

雷射探頭之光軸線與位置感測器之延長線及成像透鏡之中心線，三條線需相交於一點稱為Scheimpflug 原理。



雷射探頭三角量測原理證明：

1. Scheimpflug condition 如圖(1)所示

2. 在 $\triangle ADS$ 中 $\frac{h}{\sin 90^\circ} = \frac{\overline{AS}}{\sin \eta} \Rightarrow h = \overline{AS} \cdot \csc \eta$

$$\delta h = \overline{AS} \cdot \left(-\frac{\cos \eta}{\sin^2 \eta}\right) \cdot \delta \eta \dots (1)$$

3. 在 $\triangle ABC$ 中 $\tan \gamma = \frac{\overline{AB}}{\ell} \therefore \ell = \overline{AB} \cdot \cot \gamma$

$$\delta \ell = \overline{AB} \cdot (-\csc^2 \gamma) \cdot \delta \gamma \dots (2)$$

4. $\therefore \frac{\delta h}{\delta \ell} = \frac{\overline{AS} \cdot \left(-\frac{\cos \eta}{\sin^2 \eta}\right) \cdot \delta \eta}{\overline{AB} \cdot (-\csc^2 \gamma) \cdot \delta \gamma} = \frac{\overline{AS}(-\cos \eta) \cdot \delta \eta}{\overline{AB} \cdot \sin^2 \eta \cdot (-\csc^2 \gamma) \cdot \delta \gamma} \dots (3)$

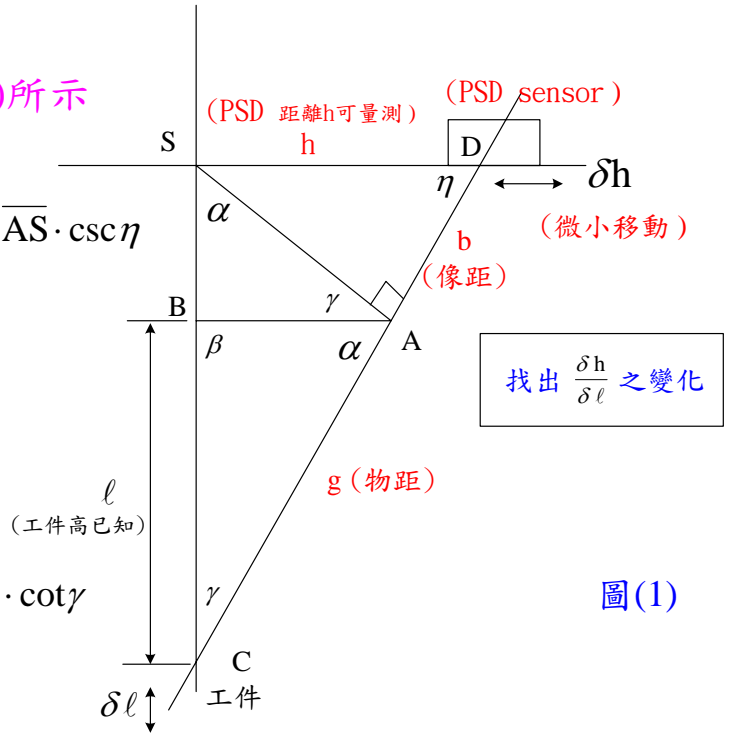
5. 由圖(1) $\tan \eta = \frac{\overline{AS}}{b}$, $\tan \gamma = \frac{\overline{AS}}{g}$, $\therefore \frac{\tan \gamma}{\tan \eta} = \frac{b}{g} \Rightarrow \sec^2 \gamma \delta \gamma = \frac{b}{g} \cdot \sec^2 \eta \cdot \delta \eta$

$$\therefore \delta \eta = \frac{\sec^2 \gamma \cdot \delta \gamma}{\sec^2 \eta} \cdot \frac{g}{b} \dots (4)$$

6. 將(4)式代入(3)式

$$\therefore \frac{\delta h}{\delta \ell} = \frac{\overline{AS}}{\overline{AB}} \cdot \frac{\tan^2 \gamma}{\tan^2 \eta} \cdot \frac{g}{b} \cdot \cos \eta \text{ , 其中 } \frac{\overline{AS}}{\overline{AB}} = \frac{1}{\cos \gamma} \text{ , } \frac{\tan^2 \gamma}{\tan^2 \eta} = \frac{b^2}{g^2}$$

$$\therefore \frac{\delta h}{\delta \ell} = \frac{b}{g} \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \gamma} = \frac{b}{g} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \eta} \text{ 得到微小位移的變化關係與物距、像距及角度成比例。}$$



圖(1)

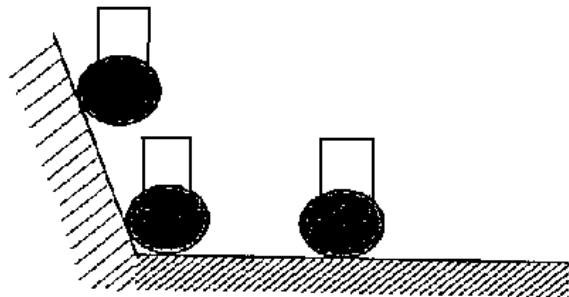
國內常用之三次元量測儀之比較

目前國內常用三次元掃瞄是以探針式之接觸式、單點雷射、以及帶狀多點雷射為主，最近馬路科技代理立體照相式三次元量測，但使用廠商尚少，其優缺點的比較如下表：

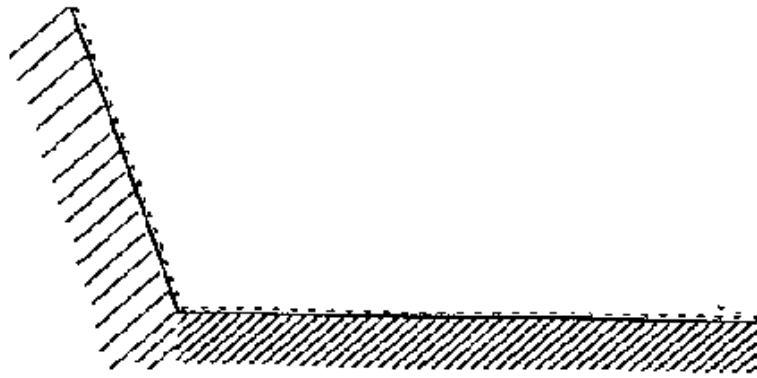
表一、國內常用三次元掃瞄器之比較

方式	接觸式	單點雷射	帶狀多點雷射
資料	需再計算與球頭半徑補正	表面資料	表面資料
速度	很慢	慢	快
工件材質	硬質材料	不限制	不限制
精度	高	高	高
量測死角	受球頭半徑	光學陰影區域	光學陰影區域
誤差	變化大	小	小
價格	中等	中等	高
與 NC 連線	可	可	可

早期是以探針式為主，雖然價格較便宜，但速度較慢，而且以探針與物體接處會有盲點並且使物體容易變形，同時必須對探針之球頭半徑作補正，才能得到真正量測座標，如圖 1-2 所示；雷射掃瞄式快、精確度佳，尤其雷射光帶掃瞄一次掃瞄處理 512 點，在處理複雜曲面節省相當多時間，但其易受光線陰影所影響，因此常需在量測表面作白色不反光之噴漆處理，以減少光學陰影所造成誤差。



(a) 探針量測方式（一般球頭探針直徑圍 2 mm）。



(b) 雷射掃瞄式 (以光帶掃瞄是以 $60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ 取均質)

圖 1-2 探針量測與雷射掃瞄式之比較

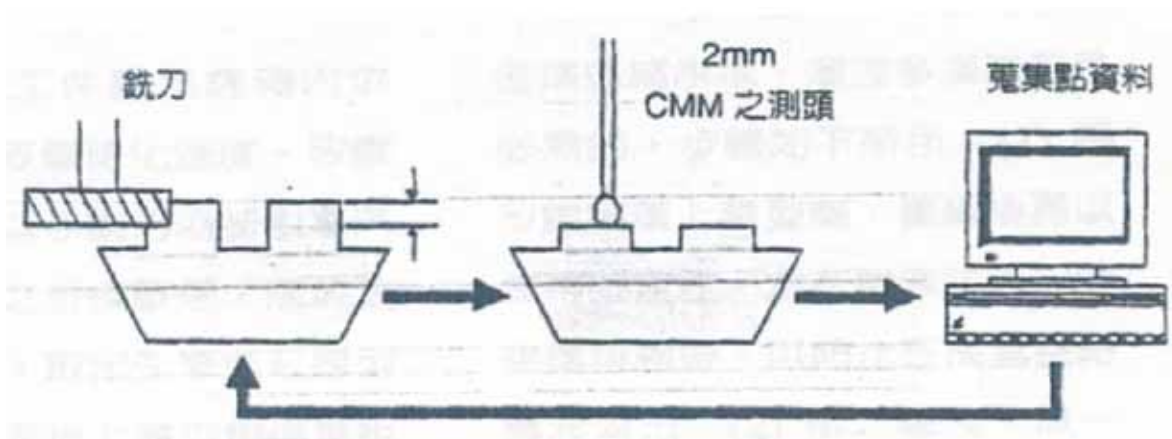


圖 1-3 量測汽缸輪廓幾何資料示意圖

三次元量測之應用

日前 3D 掃瞄儀器系統被廣泛應用在各種行業，從製造業之電腦輔助設計與製造之結合、品管之檢測、醫學之立體定位、廣告與動畫、到美容與服裝設計可謂包羅萬像，如下圖所示：

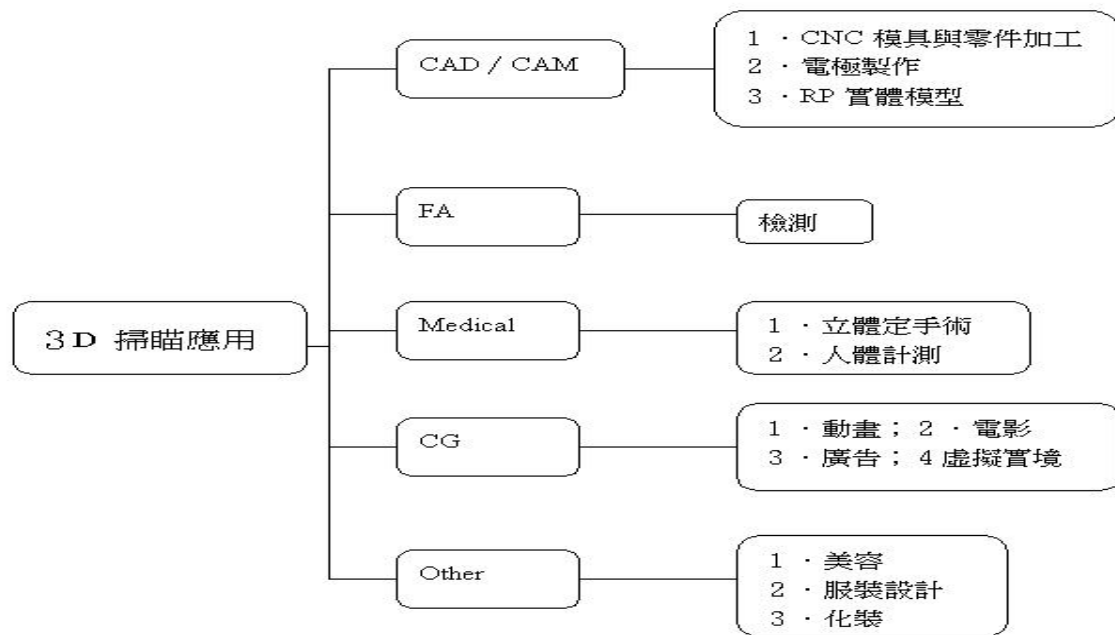


圖 1 三 D 掃瞄之應用

	掃瞄循跡專用機	3次元量床	雷射掃瞄儀
量測方式	接觸式	接觸式	非接觸式
感測器	類比壓電元件	開關元件	光電元件
接觸壓力	20~30g	150g 以上	無
量測精度	小於 50 μm	1 μm	10 μm ~100 μm
電子尺解析度	5 μm		100~150 μm
機台結構	空氣軸承內 花崗石台面 AC 伺服系統	空氣軸承 花崗石台面	一般滾珠軸承 一般鋁製平台 AC 伺服或步進系統
量測速度	140 點 / sec	人力控制	1000~12500 點 / sec
工件材質	接觸壓力 容許的材質	硬質材質	不限
前置作業	校正基準面 設定座標系統	同左	需噴白漆 無基準點
量測死角	球頭半徑限制面交 接處之尖角	同左	光學陰影處 光學焦距變化區
誤差	均勻	隨曲面變化大	部分失真

表 2 接觸式與非接觸式量測系統比較

逆向工程之應用

隨著時代的進步，電腦軟硬體的持續發展，使得 3D 電腦輔助設計及製造有了快速的進步，並在工業界已普遍被使用，尤其在醫療界及模具業的使用上更是有驚人的改變。3D CAD/CAM 大量簡化了模具開發的時間，故在產品開發及自動化生產上已有著舉足輕重的地位。

工業技術不斷的提昇和產品的需求多樣化、複雜化以及產品生命週期縮短，因此如何在最短時間內將產品設計與製造完成，以掌握市場的先機，實為工業界一重要的課題。然而並非所有的產品均有設計圖面，它們的外型可能是老師傅或設計師用雙手及黏土捏造出來，再用人力以土法練鋼的方式作出造型近似的模具，其中的過程十分煩雜且仍究無法產生 3D CAD 資料。為了克服這些問題，於是逆向工程技術應運而生。應用逆向工程技術可快速完成產品的設計與製造，並可應用於汽機車零組件、運動器材、醫療輔具、家電用品、玻璃、木鞋模、高爾夫球頭及陶瓷製品、快速原型製作 (Rapid Prototyping)：如精密鑄造產品、工業造型設計等，人體形狀量測如：人頭像、人造腿骨、齒模、複雜曲面量測等。

目前所稱的逆向工程是針對一現有工件（樣品或手工模型）利用 3D 數位化量測儀器準確、快速的將輪廓座標量得，並加以建構曲面、編輯、修改後，傳至一般的 CAD/CAM 系統，再由 CAM 所產生刀具的 NC 加工路徑送至 CNC 加工機製作所需模具，或者送到快速原型機 (Rapid Prototyping) 將樣品模型製作出來，再利用快速模具技術進行小量多樣的翻製。本系統將整合接觸式及非接觸 3D 量測系統，接觸式 3D 量測系統應用於高精密尺寸的幾何形狀，而非接觸 3D 掃描量測系統主要應用於複雜曲面形狀的量測。

未來趨勢

每套系統都各有其功能特色及擅長處理問題，並非萬能，系統只是工具，遇到不同問題用不同方法來解決，相輔相成才能達到最效果。逆向工程在目前也不一定適合每個產業，有些產業要在逆向工程的技術更成熟的時候才適用。而鑑於市場的需求及未來發展性，目前各CAD／CAM系統都開始研發逆向工程，由於企業轉型，逆向工程的市場可以預期的會愈來愈大，尤其以（Rapid Prototyping）機器的成熟，結合快速原型與快速模具（RP／RT），成為未來的一個趨勢，台灣傳統產生製造品，將面臨一個改革性蛻變，才有辦法生存下去。

發展現況與瓶頸

許多產品開發都需要逆向工程，以往早期逆向工程都應用在汽、機車與模具的開發，如今已應用在各種行業上，例如醫學工程、航太工程等。

台灣過去大部分以**一般泛用型 CAD/CAM 系統從事逆向工程**，一般的 CAD/CAM 軟體其實也可以作逆向工程後處理，但終究不是專為逆向工程的流程所設計的，因此**曲面重建系統就有下列困難**：

1. 點資料龐大：一般常用 CAD/CAM 系統通常無法處理龐大資料。
2. 簡單幾何形狀無法處理：簡單幾何形狀因掃描誤差無法將掃描資料真實的反映出來。
3. 複雜曲面編修：一般常用 CAD/CAM 系統，不易表現複雜曲面此外複雜曲面重建與整修相當困難。

以上問題沒有解決，造成一般 CAD/CAM 系統效率低、不準確等問題，目前已有處理逆向工程之專業軟體，但尚有許多限制，下一節將進一步加以討論。