

精密機械的精度理論探討



台大機械系 范光照 教授

100年12月23日

中興大學理學院

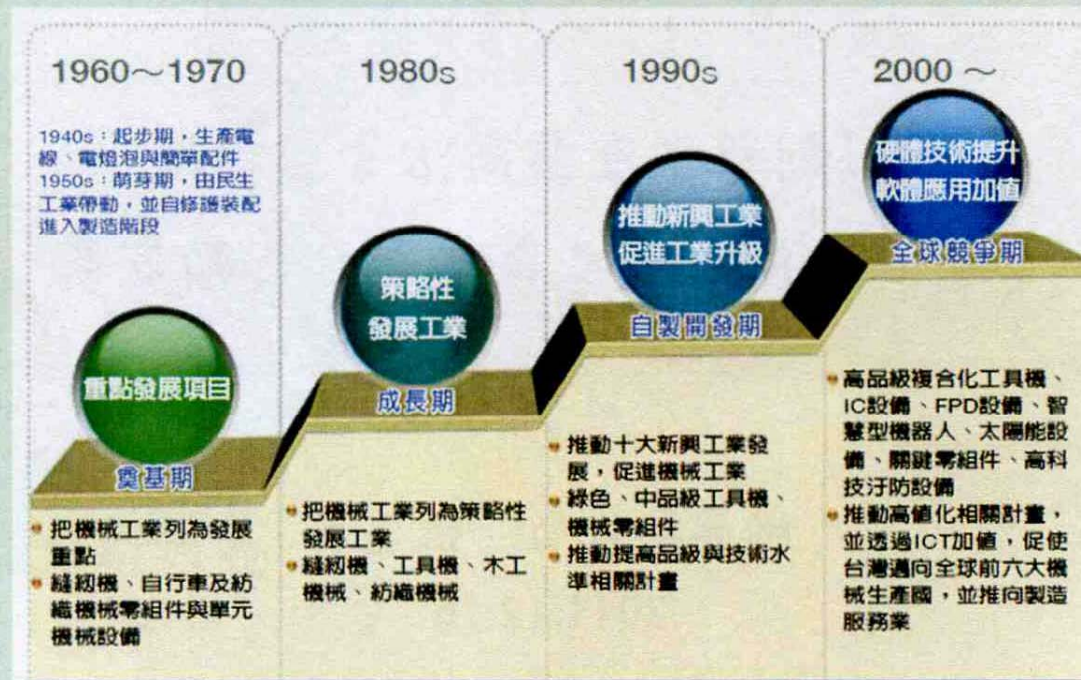
何謂精密機械？

簡介內容

- 台灣的精密機械產業
- 精密機械定義與範疇認識我
- 精密機械設計基本原則認識
- 精密機械基礎性的重視 (範例介紹)

一、我國精密機械產業概況

(一) 發展過程

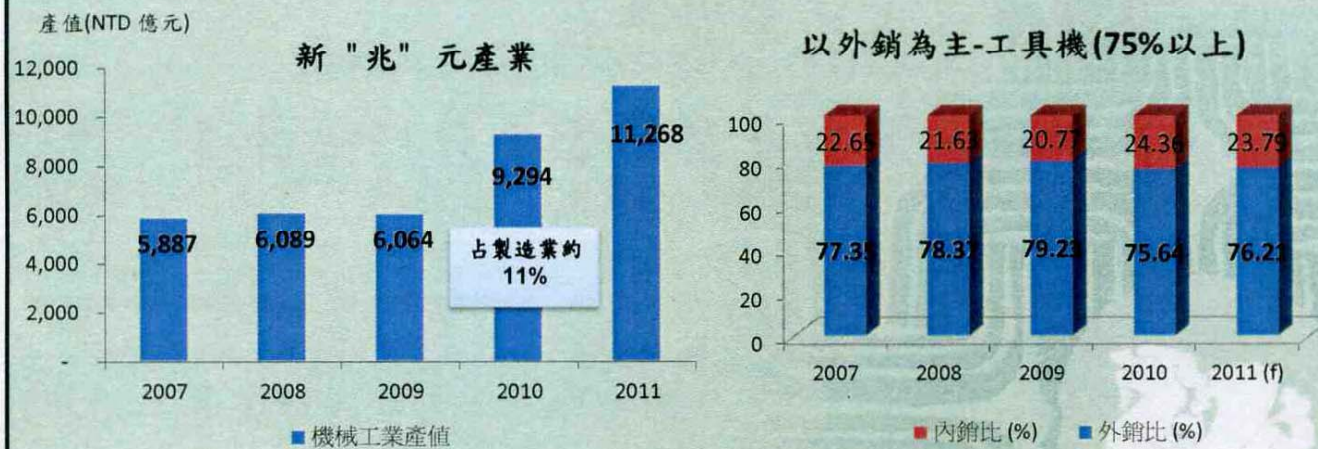


資料來源: 工研院

一、我國精密機械產業發展過程及產業概況

(二) 產業概況

- 2011年ECFA早收清單生效後，產值直逼兆元。
- 精密機械工業產值高、以外銷為主(Ex. 工具機)。



註: 2011年為預估值; 資料來源: 工研院 IEK

資料來源: 台經院產經資料庫, 2011年7月。

4

世界工具機生產國排名

2010			2009	
排名	國別	產值	國別	產值
1	大陸	199.8	日本	153
2	日本	118.42	大陸	108
3	德國	97.50	德國	70.07
4	義大利	51.66	義大利	52.42
5	韓國	44.98	韓國	27.58
6	台灣	38.03	台灣	22.66
7	瑞士	21.85	美國	22.19
8	美國	20.26	瑞士	21.65

單位：億美元

2011年1~9月 台灣工具機產值約30億美元

兩岸工具機出口單價比較

產品名稱	2010年(台灣) (台幣/件)	台灣 主要出口國	2010年(中國) (台幣/件)	中國 主要出口國	差異 (台灣：中國)
綜合加工機	1,783,007	中、美、土、印	813,203	韓、越、美、土	2.19:1
車床	285,737	中、美、土、印	210,637	韓、美、德、日	1.36:1
鑽、鏜、銑	252,472	中、香、巴、美	203,375	美、德、印、緬	1.24:1
磨床	45,536	中、香、美、印	23,078	美、德、越、印	1.97:1
放電、雷射	366,803	中、香、韓、美	201,398	香、美、韓、印	1.82:1
鍛壓、衝壓 成型	379,162	中、泰、馬、巴	227,498	印、越、緬、馬	1.7:1

資料來源：中華民國財政部關稅局、中國進出口資料；PMC彙整

各國工具機在大陸市場銷售比較-綜合加工機

單位：美元

綜合加工機	2010			2009		
	銷售金額	台數	平均單價	銷售金額	台數	平均單價
日本	1,990,326,988	20,072	99,159	607,500,246	3,850	157,792
德國	507,393,913	762	665,871	337,126,715	456	739,313
台灣	460,235,633	6,404	71,867	183,300,467	2,105	87,079
韓國	211,369,337	2,373	89,073	144,547,515	1,480	97,667
義大利	117,616,532	113	1,040,854	102,568,525	95	1,079,669
瑞士	52,931,948	133	397,985	44,728,451	95	470,826
美國	62,369,193	1,233	50,583	27,344,772	467	58,554

資料來源：大陸進出口統計資料、財團法人工具機發展基金會

- ❑ 2010年我國綜合工機佔工具機出口31.7%，出口大陸佔該機種出口值49%。
- ❑ 我國出口大陸市場台數第2、銷售金額第3、平均單價第6。
- ❑ 德國、義大利、瑞士輸出大陸主要為終端使用者特殊需求，進口量少，平均單價較高。
- ❑ 各國機種近年年平均單價均逐年下降。探究原因，各國均以優質平價化機種對準大陸市場進行銷售。

工具機市場(2)

產品說明

工具機種類之市場佔有比例

序	內 容	比 重
1	切削工具機:成型工具機	80:20
2	綜合加工機/切削工具機	40%
3	車床/切削工具機	25%

(1)車床之全球市場約為美金**120**億元，近**NT.4000**億元。

(2)台灣**2006**年之(**CNC**車床:傳統非**NC**車床) $\div$ (**7 : 3**)

(3)汽車(零件)產業發達國家對[車床]需求比重越高，例如：

日本、韓國、美國；綜合加工機:車床 $\div$ **1:1**。

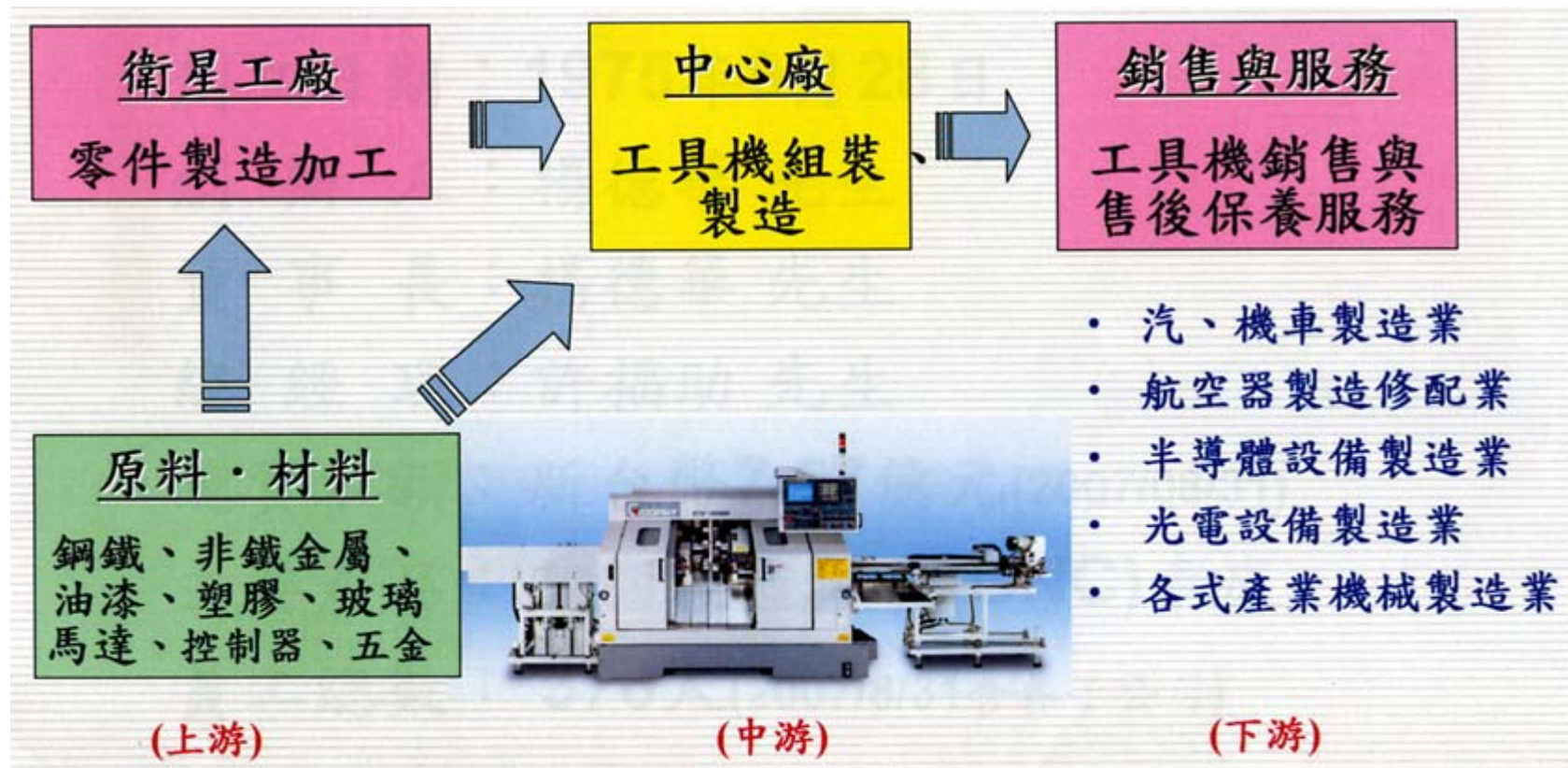
(4)[程泰] 約佔台灣**CNC**車床產值之**11~12%**，領先同業。

工具機產業關聯

75%在台中地區

傳動模組、主軸模組、
驅動及控制模組、刀
具模組、床台…

台中精機、永
進、程泰、大
立、百德….



真的都是屬於精密機械的產值嗎？

當然不是！絕大部份仍屬產業機械

(金屬加工用機械、電子及半導體生產用機械、其他通用機械....)

精密機械與一般機械有何不同？

學會組織：機械工程學會 and 精密工程學會

美國-- ASME and ASPE

日本-- JSME and JSPE

韓國-- KSME and KSPE

歐洲-- EUSPEN, 亞洲-- ASPEN



What is Precision Engineering?

Precision Engineering is defined as **painstaking (費心)** attention to detail and requires knowledge of a wide variety of **measurement, fabrication, and control issues**.

Increasing the precision--the **accuracy** and **repeatability**--of a mechanism or process is critical to **our country's competitive position** in the world of high technology.

Professor McKeown, Cranfield University, UK

(一) 傳統機械

系統組成：零組件（機電）、組裝、控制

技術要求：設計、分析、製造、自動控制

領域：鋼鐵、車輛、工具機、紡織、模具、石化、輸
送、電機、木工、冷凍空調...

產品要求：功能符合、可靠度

規格：巨觀尺寸(Macro, 數mm以上)

精度要求在10 μm 以上（條）

(二) 精密機械 (微米) (since 1970)

增加需求：精密度觀念（準確度、解析度、重複性）

增加技術：光電感測、精密定位與控制、誤差補償、材料、環控

領域：CNC及精密工具機、機械手臂、精密模具、精密量儀、PCB及IC製程設備....

規格：巨/介觀尺寸(Macro/Meso, 0.1mm以上)，精度要求在10- 0.1 μ m

(三) 奈米機械 (Since 1990)

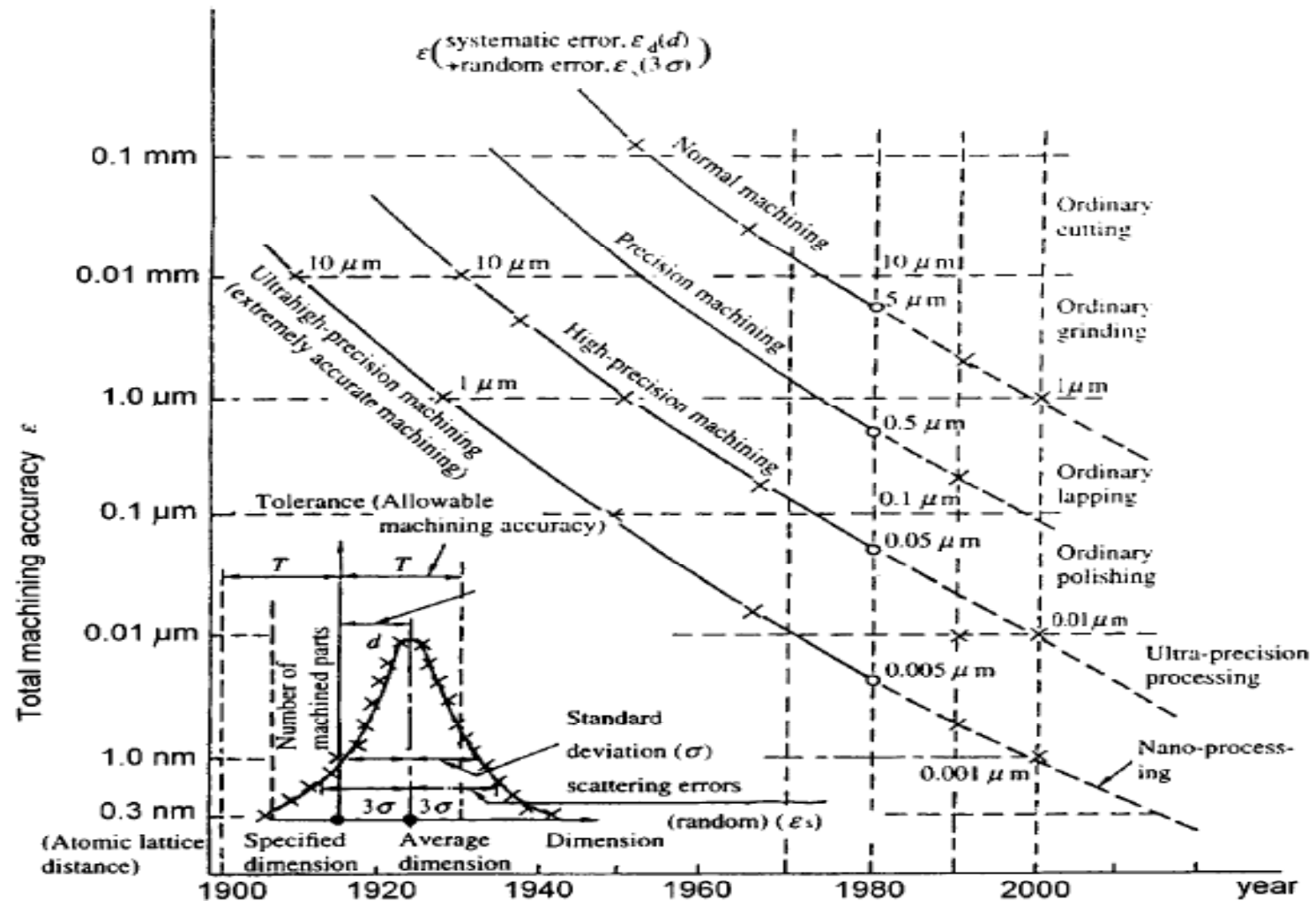
增加需求：奈米觀念（準確度、解析度、重複性）

增加技術：奈米感測探頭、奈米定位與控制、環境嚴格
控制、材料選擇

領域：IC製程設備、微器件、奈米加工、奈米量儀

規格：巨-微-奈(Macro/Micro/Nano, 10nm以上)，精度
要求在100-1 nm

Prediction of Accuracy Limits by Taniguchi in 1980



精密機械定義

廣義： 能製造比目前更高品質的機械設備或技術

狹義： 以精度為指標，達某標準者為精密機械

	現況	未來
我國相對精度要求		
（最大定位誤差/工作行程）	$< 10^{-5}$	$< 10^{-6}$
國外	$< 10^{-6}$	$< 0.5 \times 10^{-6}$
絕對精度要求誤差在	10 μm 以下	5 μm 以下
國外要求絕對精度在	5 μm 以下	1 μm 以下

例子

台灣精密NC工具機

行程 800mm, 定位誤差 $5\mu\text{m}$

則 定位誤差/行程 = 6×10^{-6} 只達現況

Wafer Stepper 32nm technology

線寬(CD) 32nm, 容許疊層(overlay)誤差 5.4nm, 移

轉台容許定位誤差 0.54nm

6吋晶圓行程 140mm

則 定位誤差/行程 = 4×10^{-9}

未來目標



Wafer Micro Defect Optical Inspection Tool

Figure 2-1: 21X5/21X8 Inspection System Main Components



12吋 US\$ 6,500,000



8吋 US\$ 2,500,000

12吋IC曝光步進機 (台幣 10億)

Photolithographic Step & repeat camera

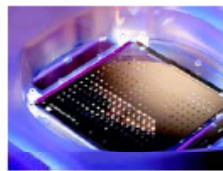


Photo mask (object)



Illuminator
("lamp house")

Laser
("lamp")

Projection lens
(demagnifying)

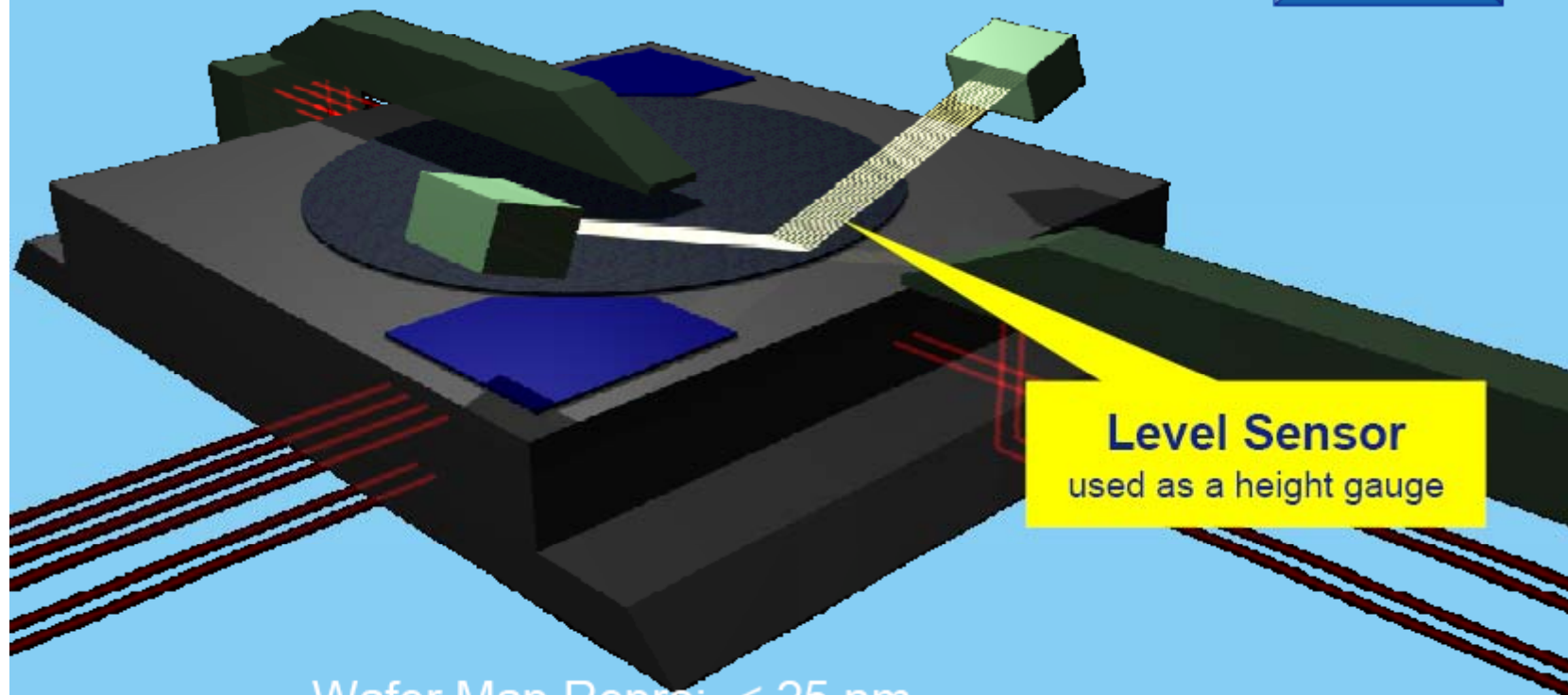


Silicon wafer (images)

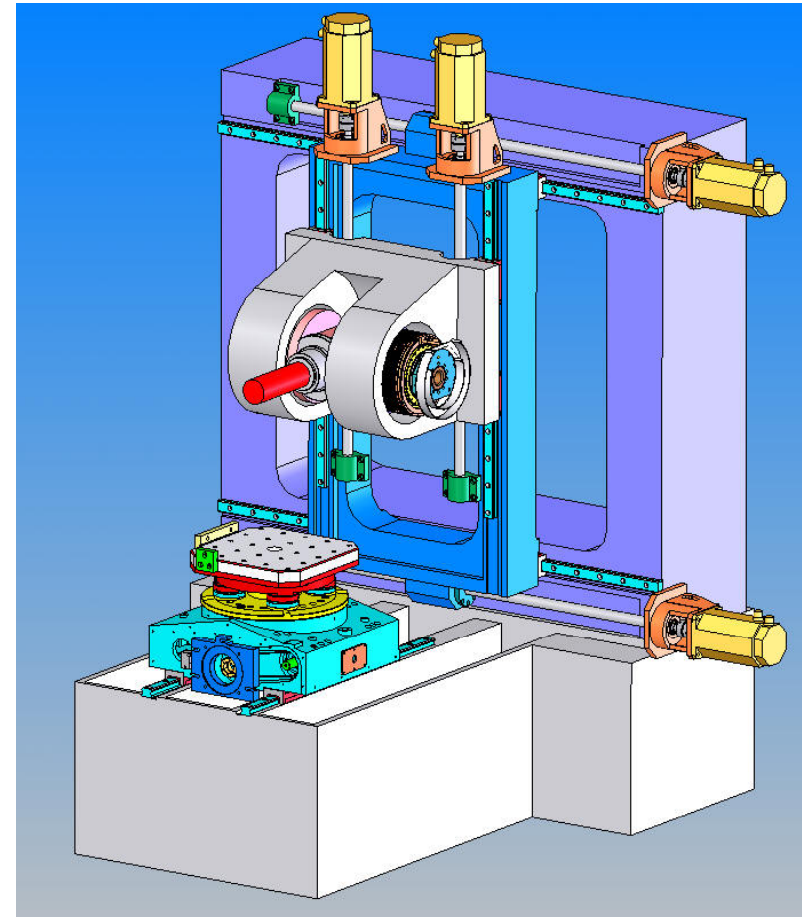
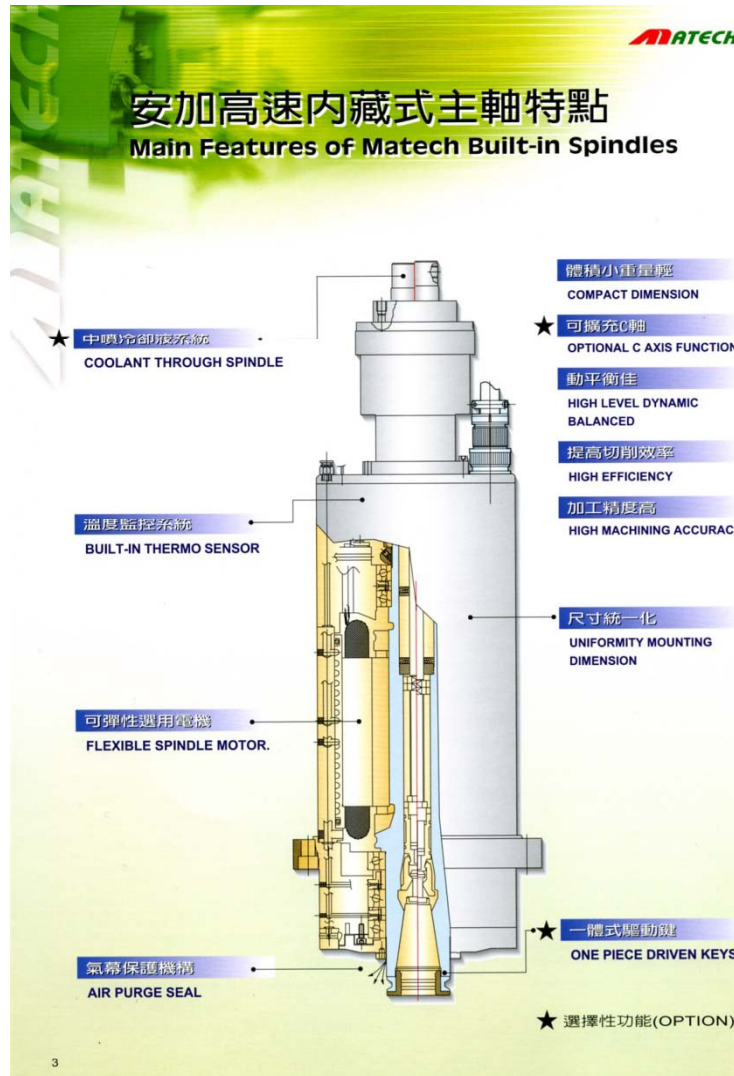
ASP:
~ €6,800,000.-



Measurement Position Wafer Height Mapping



Wafer Map Repro: $< 25 \text{ nm}$
Stage-to-Stage Focus Matching: $< 25 \text{ nm}$



The Eleven Principles and Techniques for the Design of High Precision Machines (McKeown, 1986)

1. **Structure:** symmetry; dynamic stiff; high damping; secular stability; thermal stability; independent of foundation; seismic isolation
2. **Kinematic/Semi-Kinematic Design:** rigid body kinematics; three point support
3. **Abbé Principle** (or options)
4. **“Direct sensing”** Displacement Transducers: scale or laser interferometer
5. **Metrology Frames:** isolate measuring system from force paths and machine distortion
6. **Bearings:** high accuracy; high averaging/low rumble; low thermal effects; low limiting friction; high damping

7. **Drives/Carriages:** through axes of reaction; “non-influencing” couplings and clamps
8. **Thermal Effects:** eliminate/minimise thermal inputs and drift; stabilisation/compensation
9. **Servo-Drives and Control (CNC):** high stiffness/response/response/bandwidth; zero following errors; dynamic position-loop synchronisation
10. **Error Budgeting:** (i) geometrical-angular, straightness and orthogonal error motions (ii) thermal-loop expansions; deformations
11. **Error Compensation:** linear; planar; volumetric; quasi-static and dynamic

A. 先進工具機

1. 高精度高穩定工具機技術
(定位精度 $\leq 0.1\mu\text{m}$)
2. 高精度鑲配技術
(導軌平面度 $< 1\mu\text{m}/1\text{m}$)
3. 線上即時加工量測技術
4. 智慧型切削力監控調整技術
5. 智慧精度回饋補償與效能監控調整技術
6. 多軸化技術
7. 複合化技術
(為車、銑、磨、雷射、放電、線切割或超音波等加工功能予以相互複合)
8. 微型(Meso scale)工具機技術
9. 智慧製造系統技術
(具II化監控、I化生產系統、全球化生產決策支援系統)

B. 微奈米製程與設備

1. 微影曝光/蝕刻技術
2. 精密鍍膜技術
(電漿、分子磊晶、PVD、CVD、PECVD)
3. 能量束直寫技術
4. 奈米定位及對準技術
(Mismatch $\leq 5\text{nm}$)
5. R2R轉印成型技術
(成型厚度 $< 1\mu\text{m}$ ，成型速度 $10\text{m}/\text{min}$)
6. 奈米粉體材料製程技術
7. MEMS技術
8. 微結構自我組裝技術
9. 精微電鍍成形技術
10. 3D奈米封裝技術
11. 原子層堆積技術
12. 奈米光學檢測技術
13. 奈米RP技術

C. 平面顯示製程設備

1. 精密傳輸技術
2. 結合(Bonding)/分離技術
3. 濕式塗佈/印刷技術
4. 液晶滴入(ODF)製程技術
5. 電漿束液晶配向技術
6. 真空技術
7. 雷射電極圖案成型技術
(光學解析度 $2\mu\text{m}$ ，對位精度 $\pm 0.5\mu\text{m}$)
8. 電漿鍍膜技術
(沉積速度 $120\text{nm}/\text{min}$ ，膜厚均勻性 $\leq \pm 3\%$)
9. 連續真空鍍膜技術
10. 自動光學檢測技術
(檢測精度 $\leq \pm 0.5\mu\text{m}$ ，膜厚解析度 0.05nm)
11. Roll to Roll運動平台技術
(定位精度 $\leq \pm 2.5\mu\text{m}$ ，張力控制 $1-50\text{Kg} \pm 1\%$ ，傳輸速度 $\leq 30\text{m}/\text{min}$)

D. 能源機械設備

1. 大面積電漿鍍膜技術
(沉積速度 $120\text{nm}/\text{min}$ ，膜厚均勻性 $\leq \pm 3\%$)
2. 微晶矽薄膜鍍膜技術
3. 連續真空R2R鍍膜技術
4. 量子點太陽電池鍍膜技術
5. 多級變速葉輪控制技術
6. 燃煤氯化技術
7. 二氧化碳捕捉/儲存技術
8. 生質酒精製造技術
9. 高效率LED製造技術
10. 燃料電池技術

精密機械基礎性的重視

精密度與準確度的關係（打靶理論）

所示為利用步槍射擊目標，*a* 圖為既不準確也不精密，*b* 圖為很精密但不準確，*c* 圖為準確但不精密，*d* 圖為精密但不準確，*e* 圖為既準確又精密。所射中目標愈集中，即是準確性高

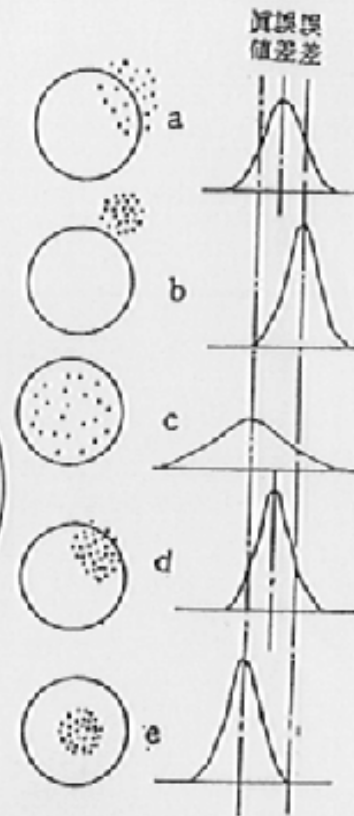
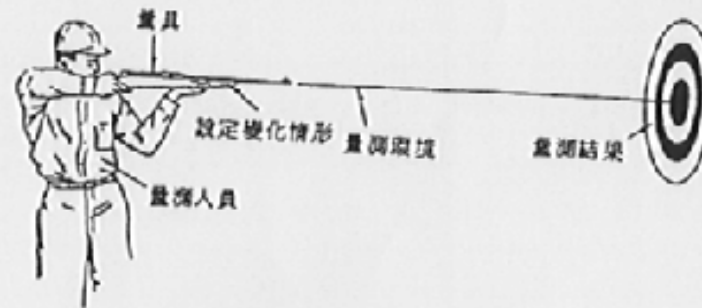


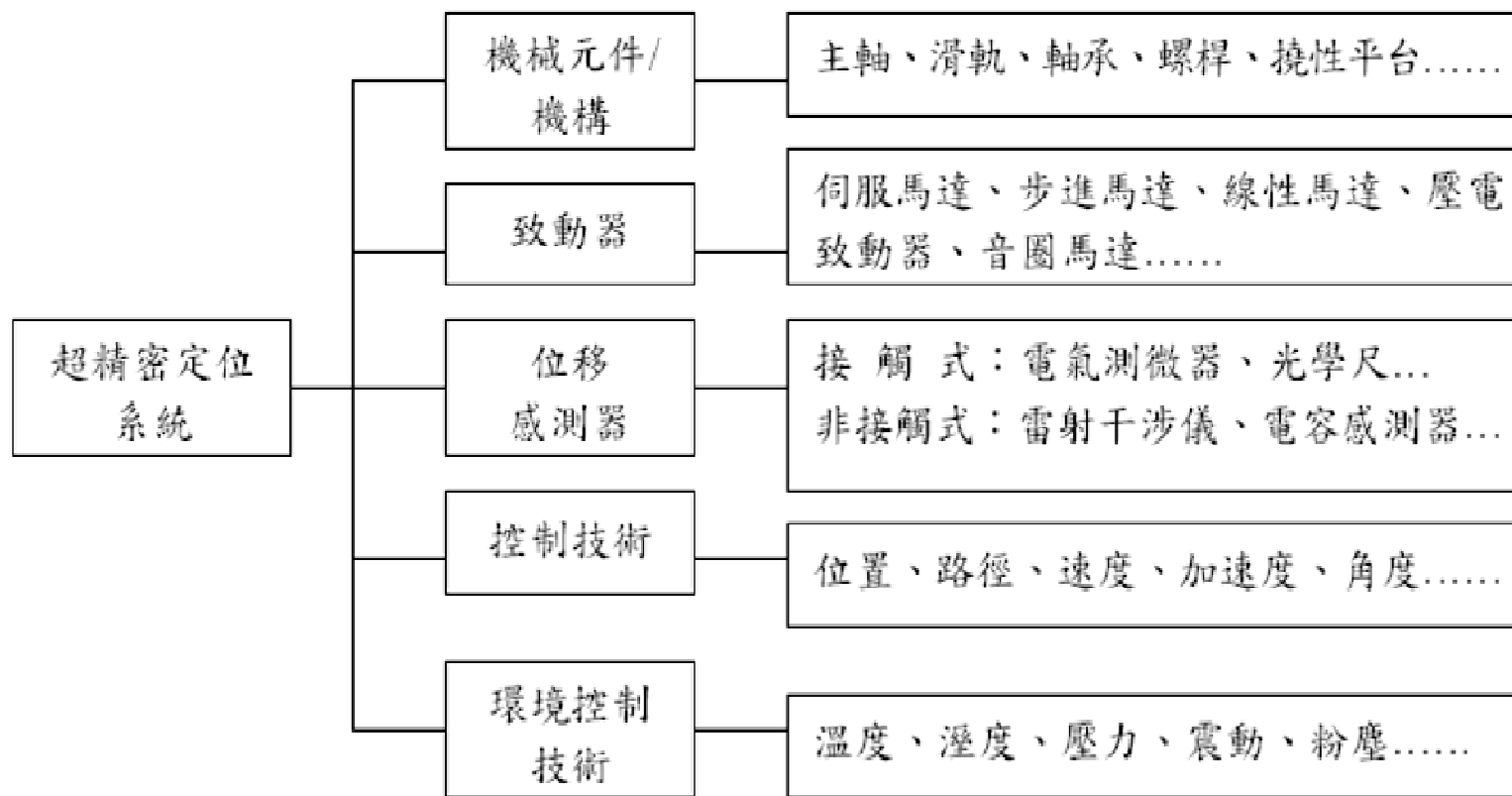
圖1-1 精密度與準確度之關係

精密機械的組成

精密機械是由**精密運動軸**(線性 + 角度)與**功能機械**
(加工、搬運、檢測)所組成。

種類(例)	運動軸	功能機械
精密工具機	X, Y, Z, α , β , γ	切削、成型
半導體製程設備	X, Y, Z, α	曝光、濺鍍、研磨、切割、 鉅線.....
平面顯示器製程設備	X, Y, Z, α	鍍膜、搬運、貼合、滴注、 切割...
精密量測儀器	X, Y, Z, α , β	探頭、光學、物性、化 性...

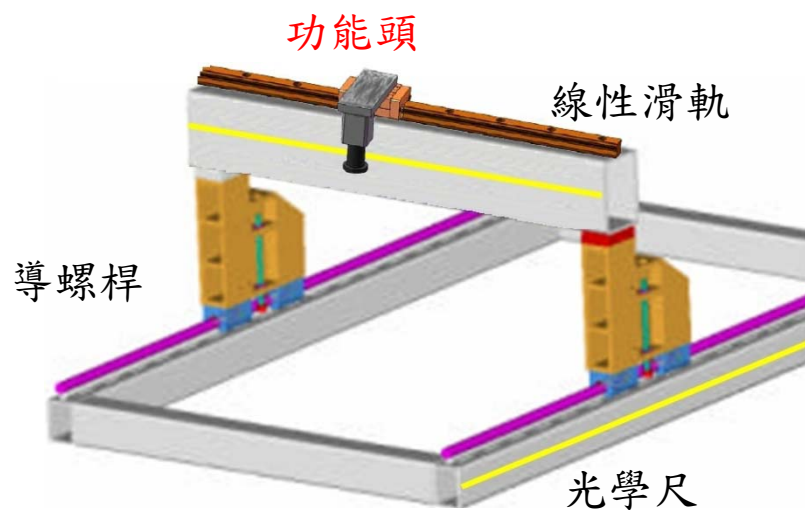
超精密定位平台的組成



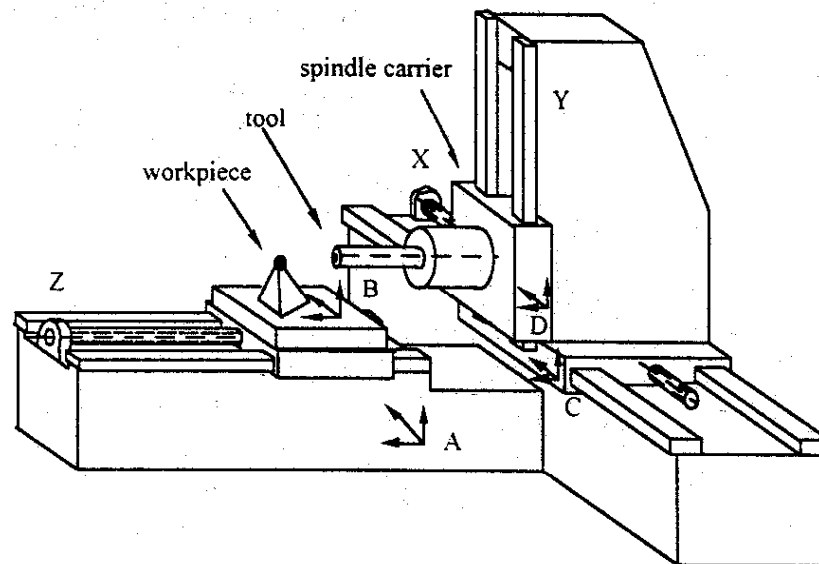
精密機械精度要求

主要檢測各運動軸的精度(準確度+重覆性)

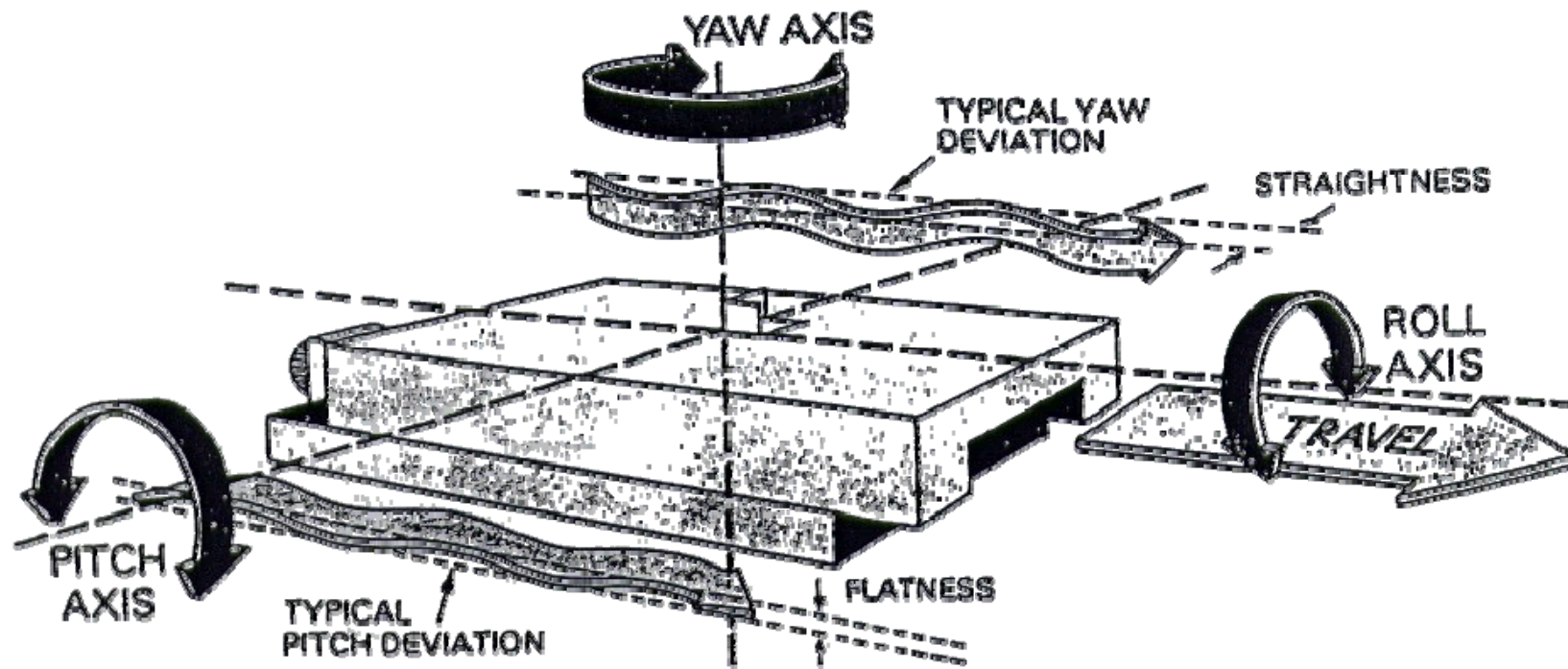
常見的運動平台結構



常見的工具結構機

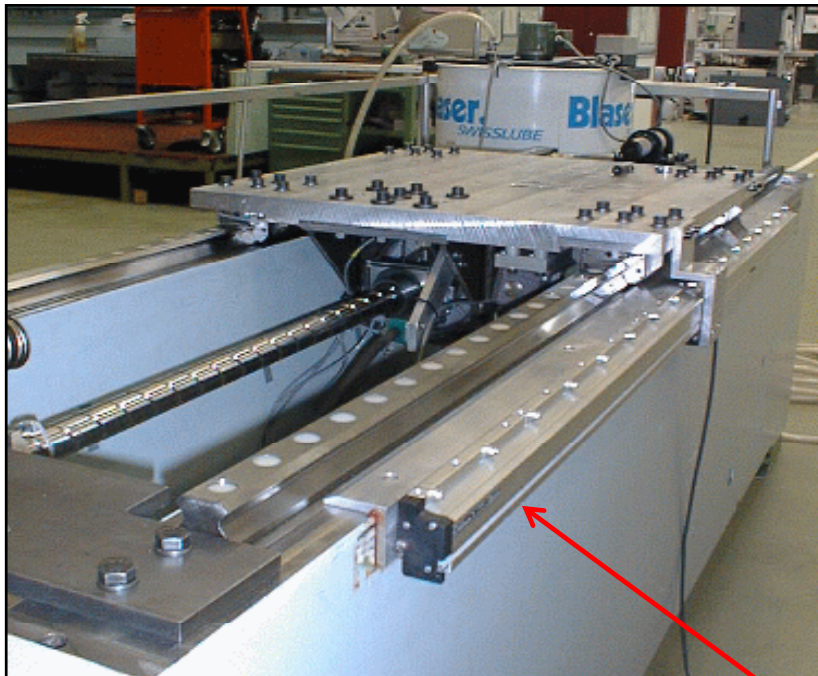


各移動軸具有六自由度運動誤差

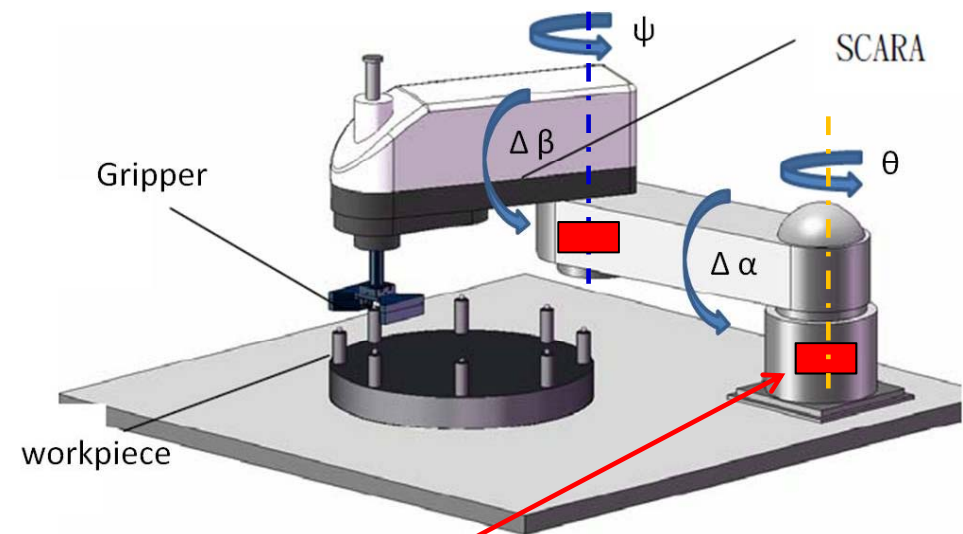


定位誤差、水平/垂直直線度、角度誤差(pitch、roll、yaw)

移動



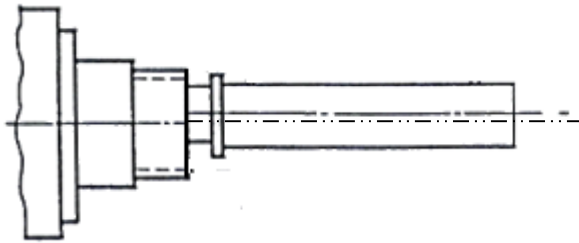
轉動



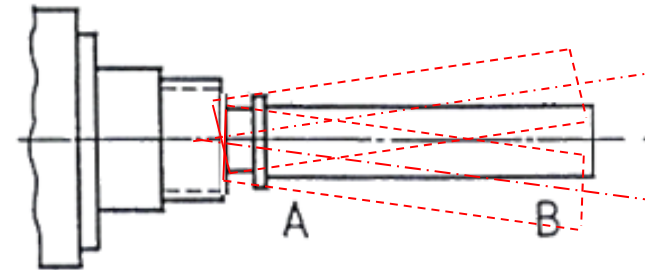
底座

■ 角度編碼器

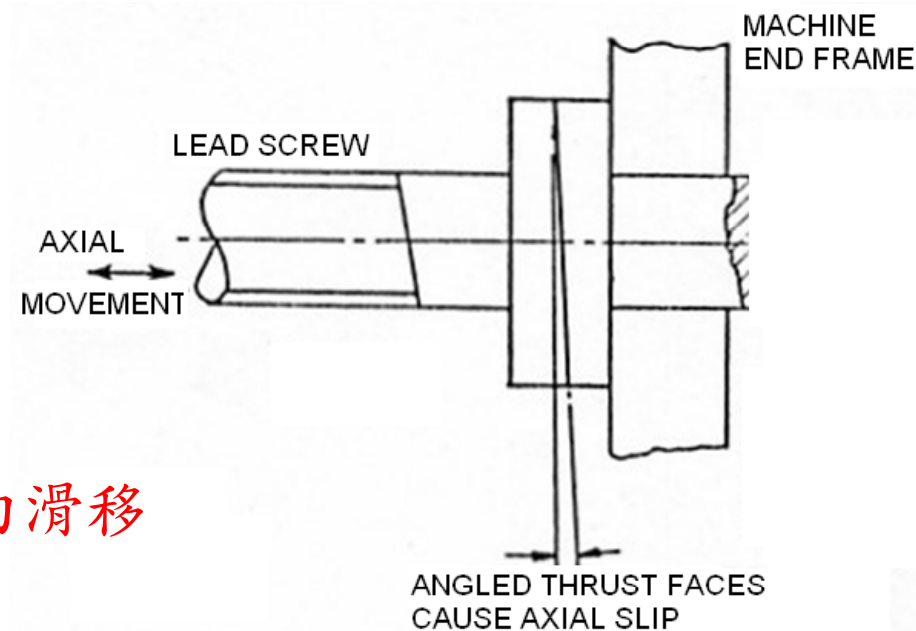
各旋轉軸具有三自由度運動誤差



偏心旋轉



偏擺旋轉



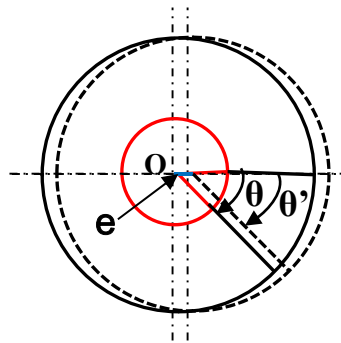
軸向滑移

Rotational angle affected by the spindle tilt

Measuring plane: encoder position

Functional plane: Table top

The measuring plane is not in line with the functional plane

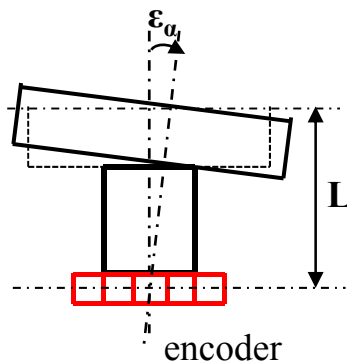


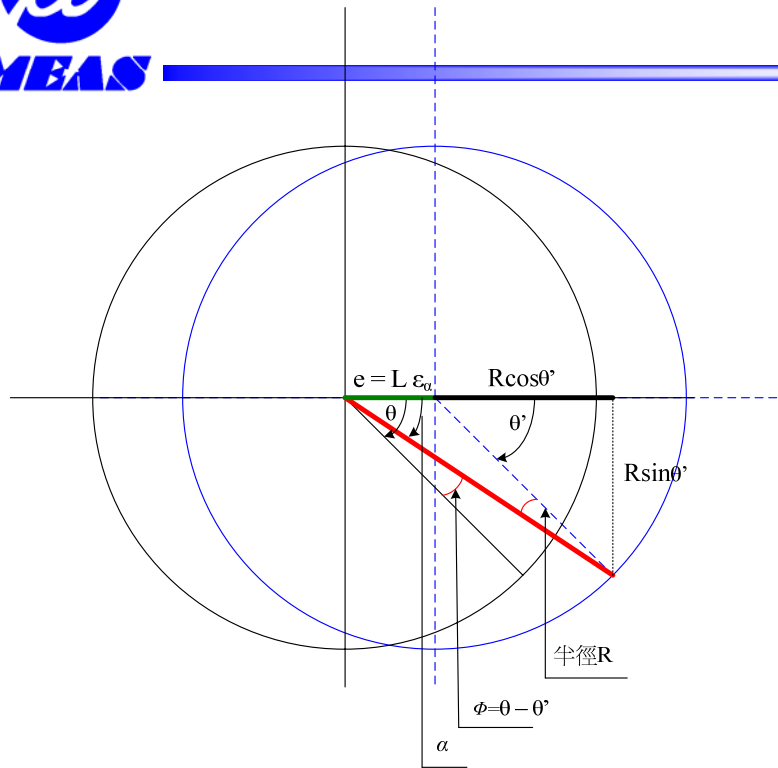
$$e = L \varepsilon_{\alpha}$$

Q1: what is amount of $(\theta - \theta')$ if there is a spindle tilt of ε_{α} in pitch

Q2: what is the angular error if the spindle tilt in roll of ε_{β}

Q3: what is the overall error if both ε_{α} and ε_{β} exist?





轉台傾斜所造成之旋轉角度誤差定義為 Φ 即老師定義之 $\theta - \theta'$
可藉由下式推導得出轉台傾斜與旋轉角度誤差之關係

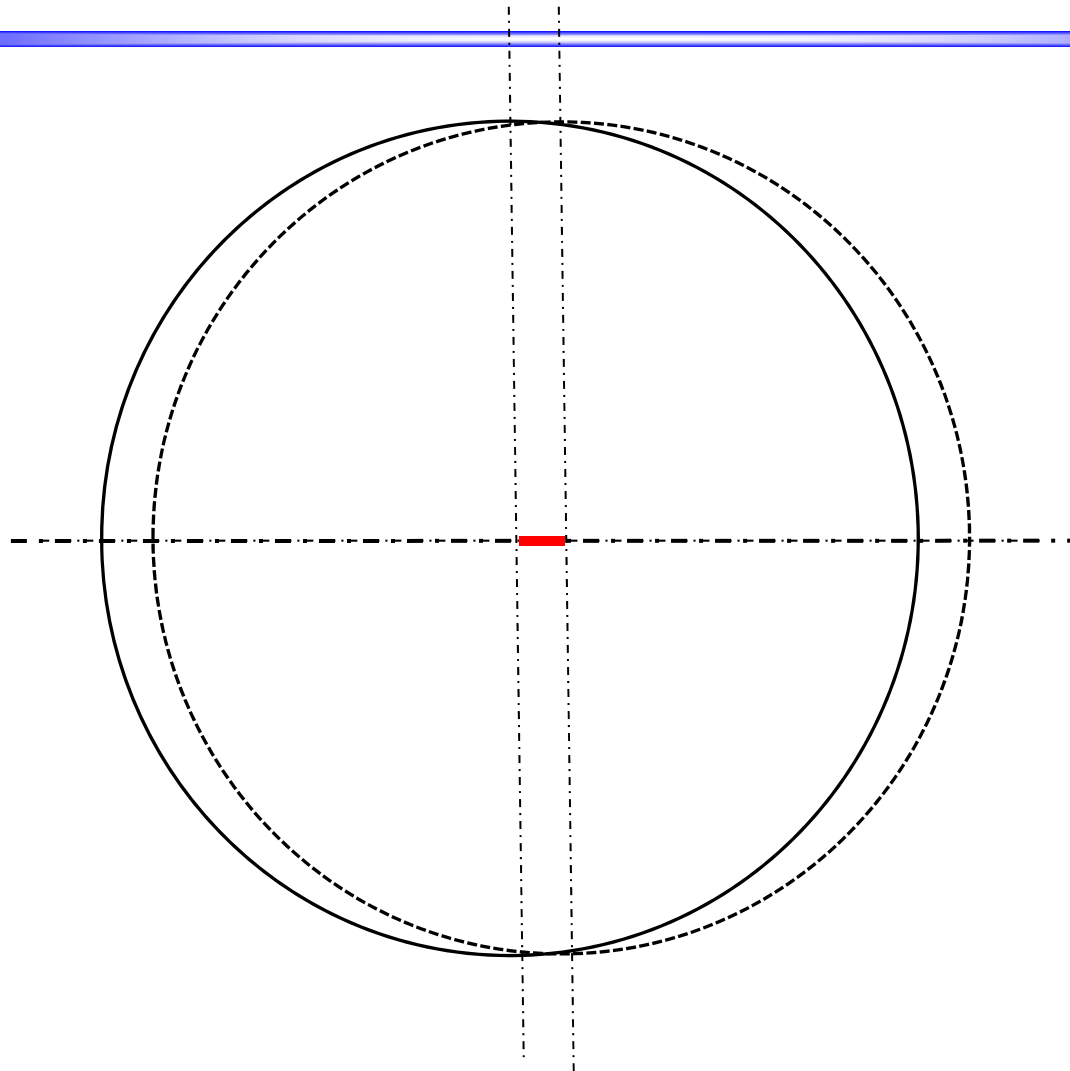
$$\text{其中 } \alpha = \tan^{-1} \frac{R \sin \theta'}{R \cos \theta' + e}$$

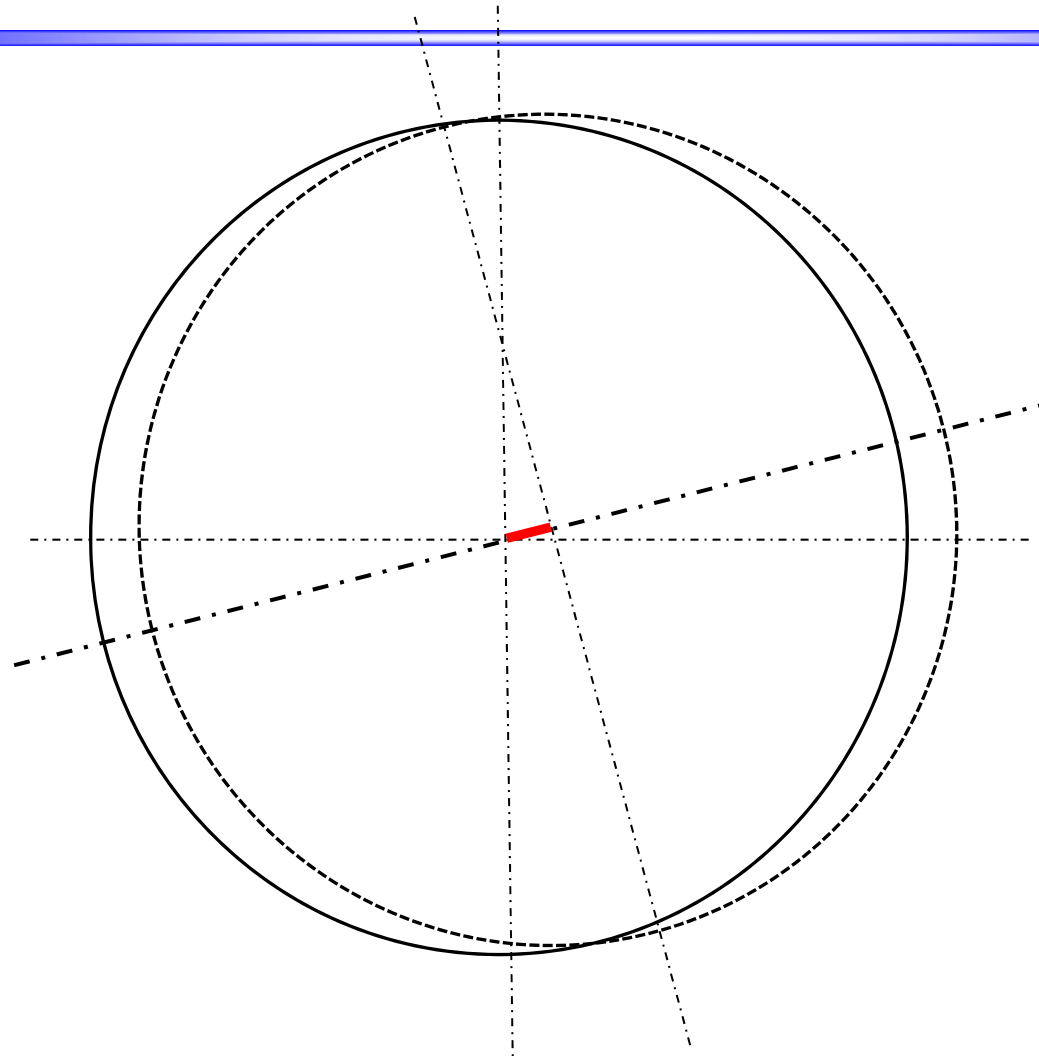
$$\text{故 } \Phi = \theta' - \alpha = \theta' - \tan^{-1} \frac{R \sin \theta'}{R \cos \theta' + e}$$

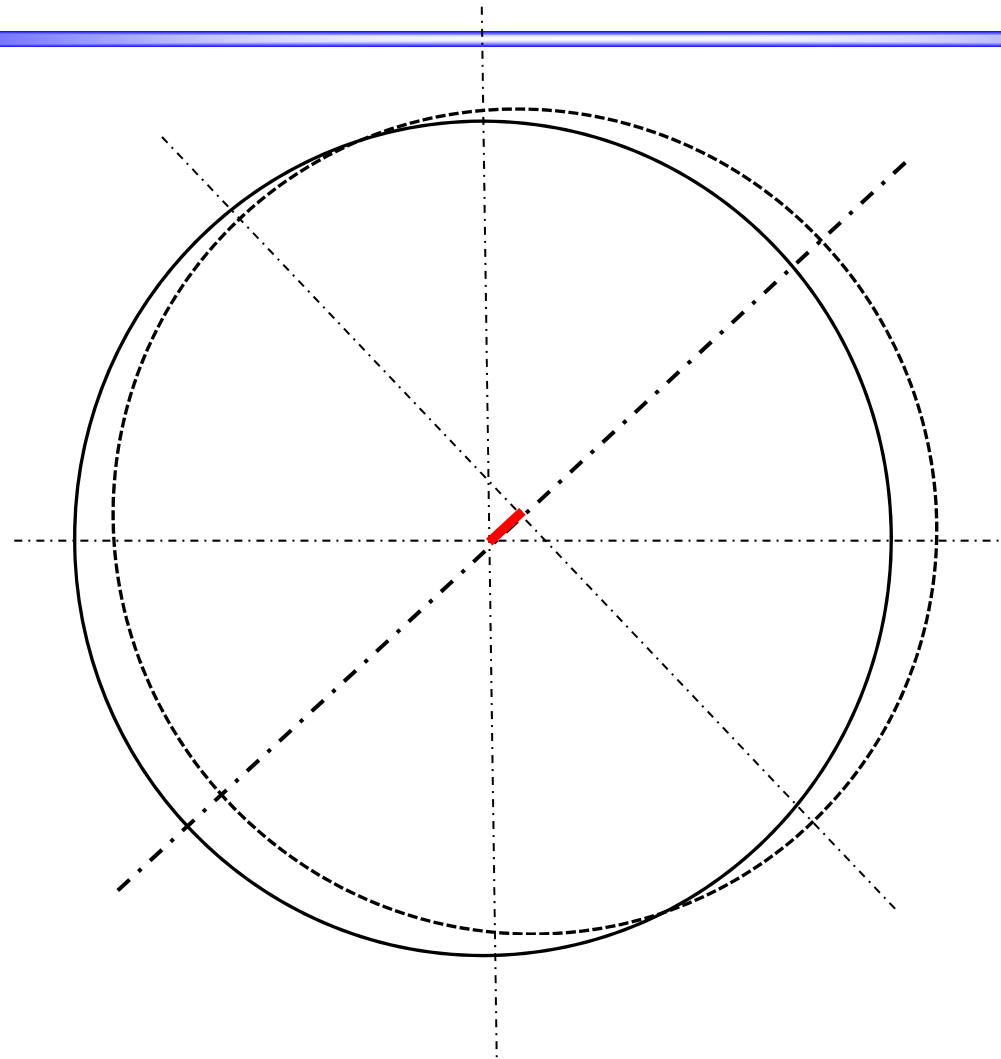
$$= \theta' - \tan^{-1} \frac{R \sin \theta'}{R \cos \theta' + L \epsilon_\alpha}$$

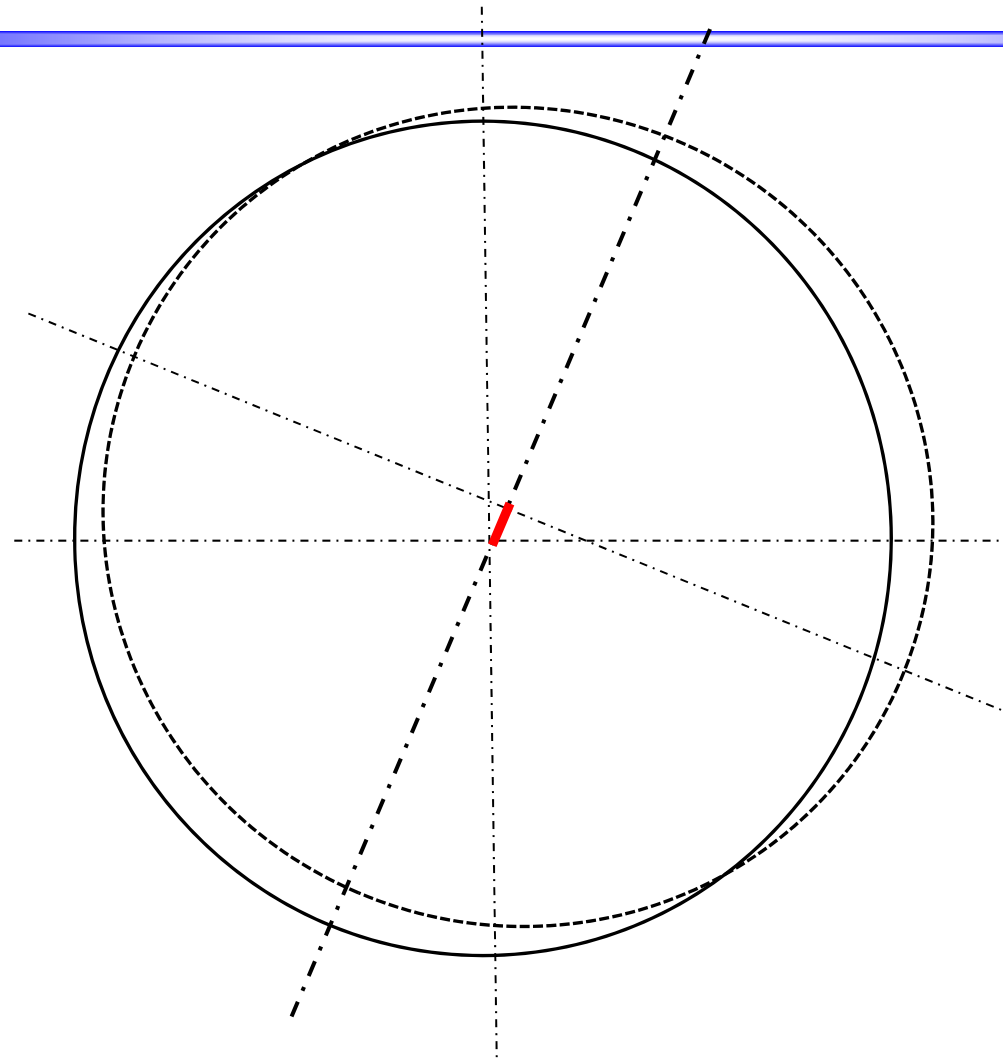
其中 θ' 為encoder所得之旋轉角、 R 為轉台半徑、 L 為encoder至轉盤之中心距離、 ϵ_α 為轉台之傾斜角。

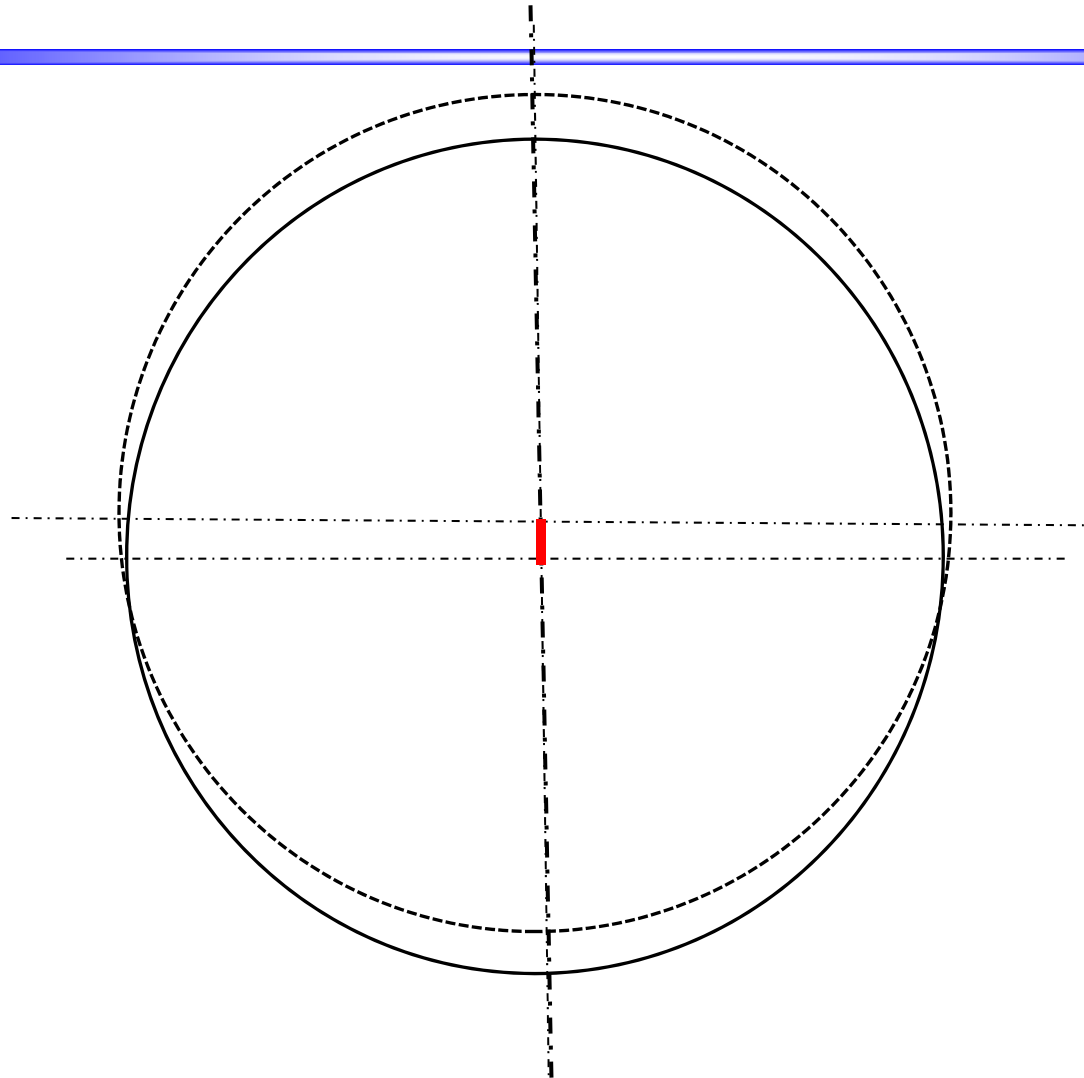
即若轉台產生一傾斜角(或主軸旋轉時偏擺) ϵ_α 角，
則實際轉台所得之角度值會與encoder值相差 Φ 角。



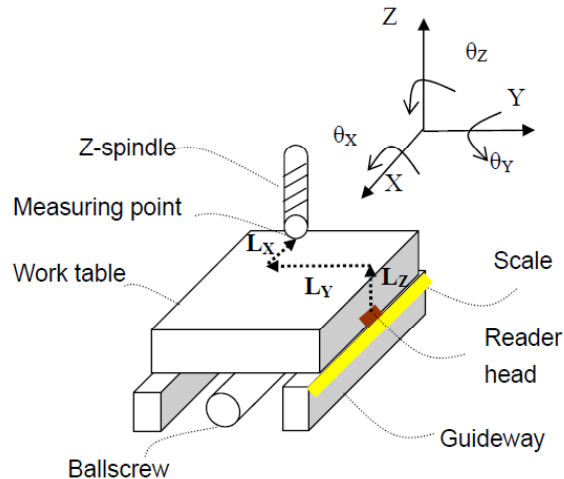






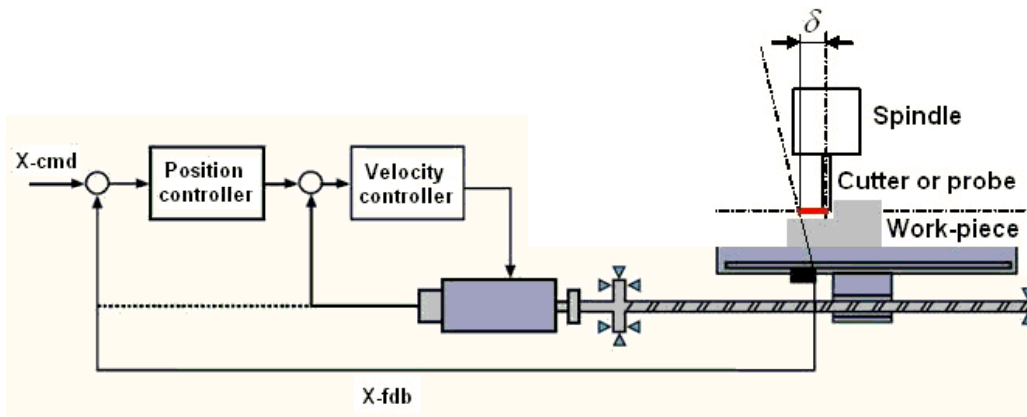


常發生的精度問題 (1)



號稱的精密工具機不夠精密:

空間定位精度差!

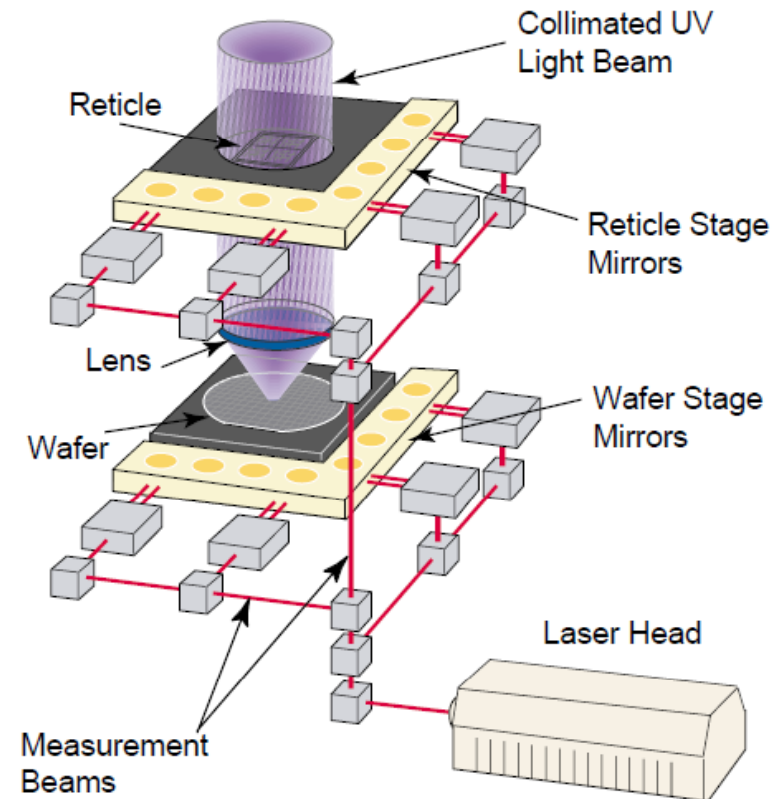
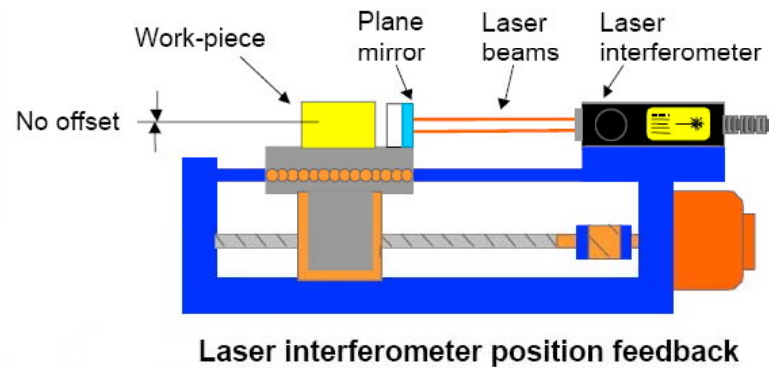
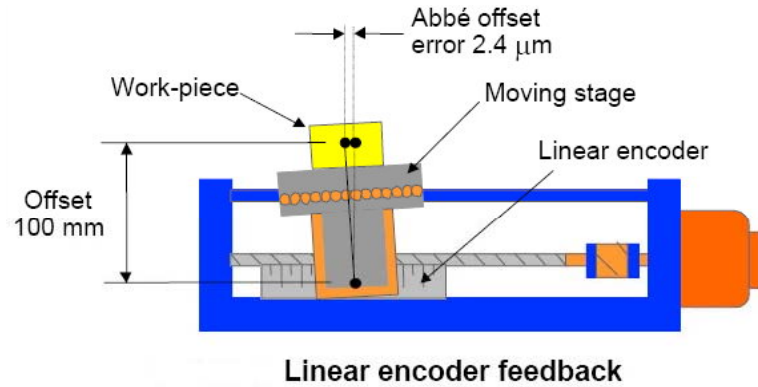


主要原因:

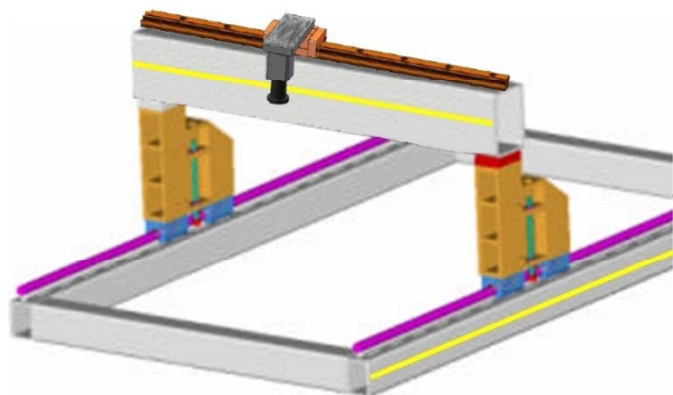
現有運動控制的位置回授點並非指令點, 存在阿貝誤差

阿貝原則: 在位移量測時, 感測軸必須與移動軸在同一軸線上, 或其延長線上. (精密機械第一定理)

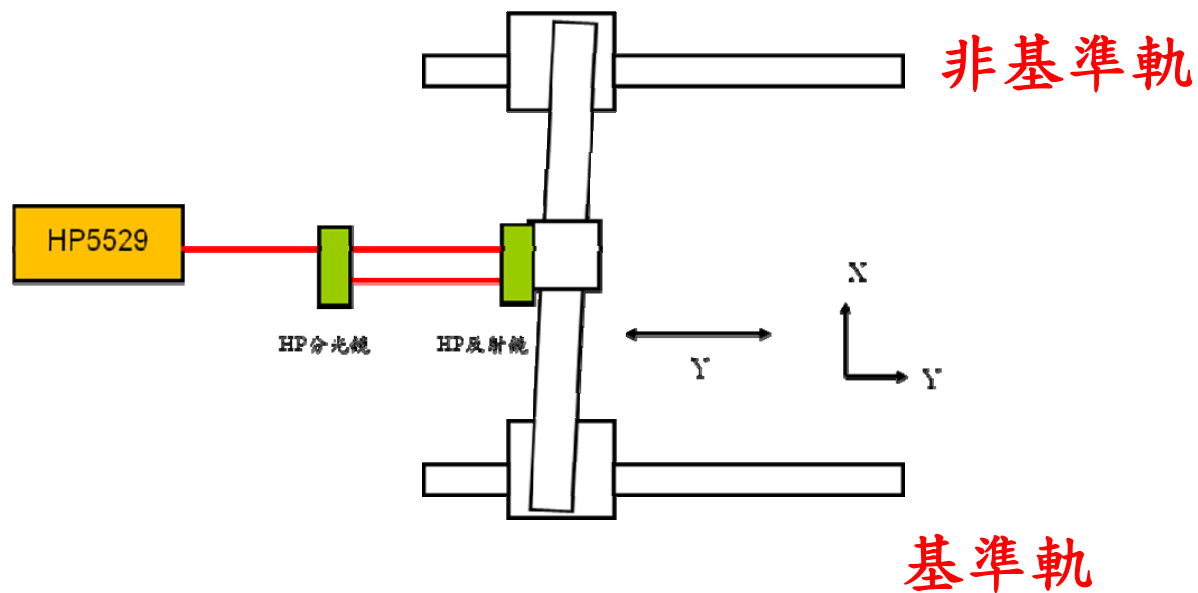
阿貝原則於精密機械的應用



常發生的精度問題 (2)

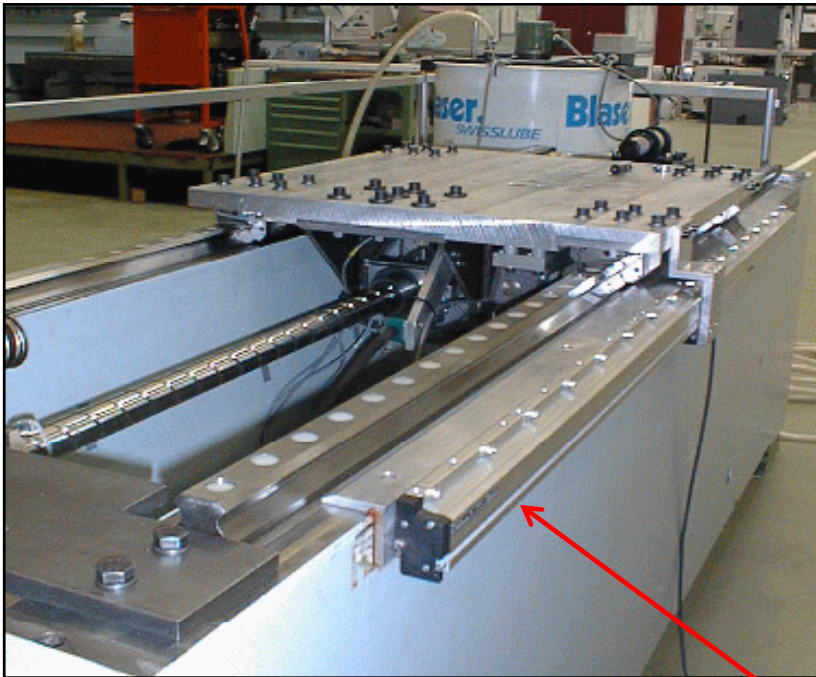


龍門式機台的兩導軌平行度差，
導至左右邊定位精度差很多

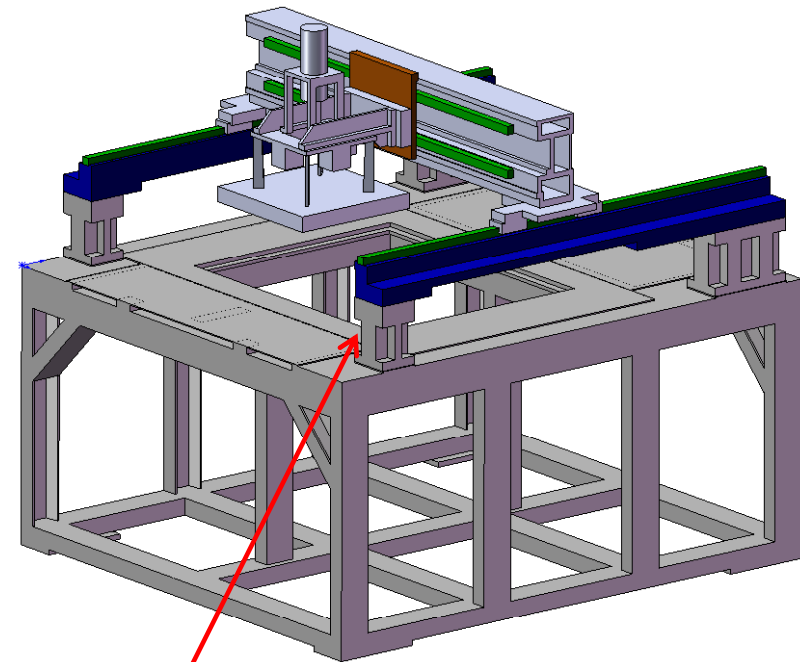


機器的基礎結構: 底座及線性滑軌

工具機



量測儀



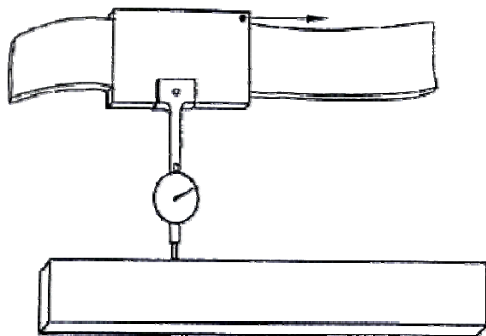
底座

精密機械基礎性的重視 (範例介紹)

機器底座精密度沒調好，上層再加任何先進功能都不穩
(蹲馬步原理: 功夫下了沒?)

例一：線性導軌直線度調整

現行方法: 直規+量錶

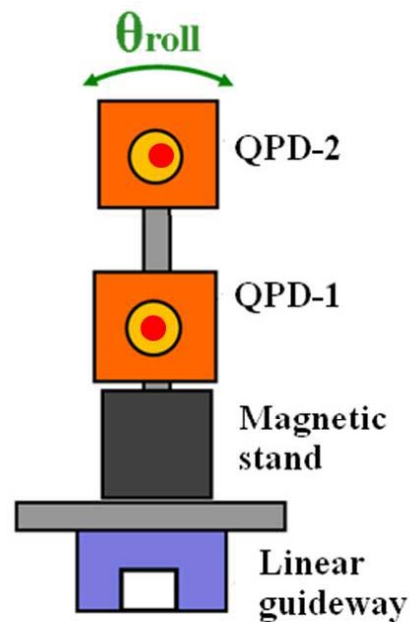
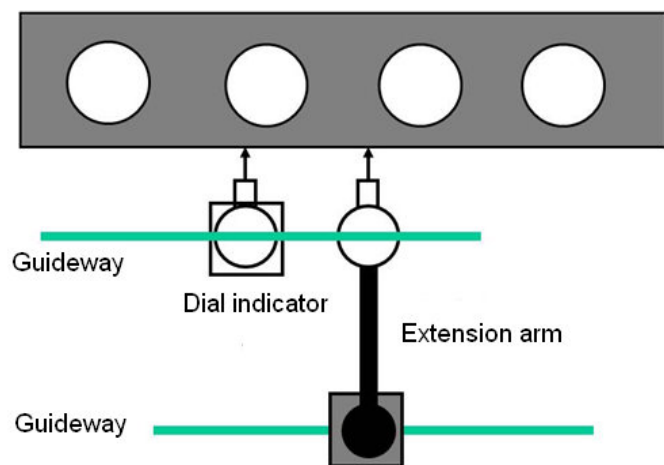


對嗎?

直規及量錶法之量測誤差

基礎問題: 滑座有角度誤差

直規之不同水平偏位及不同垂直高度都造成直線度不重覆



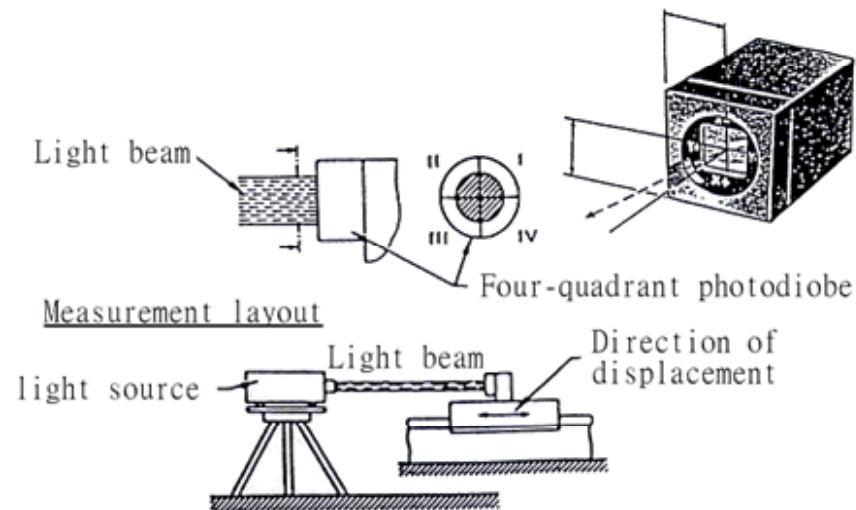
違反布來恩原則(Bryan Principle)

Bryan Principle: 直線度量測時參考的**量測軸線**要與被量測的**移動軸線**同軸

直規及量錶法之量測誤差

什麼是最佳直線度檢測方法？

雷射準直儀原理：準直雷射光 + 四象位光感測器



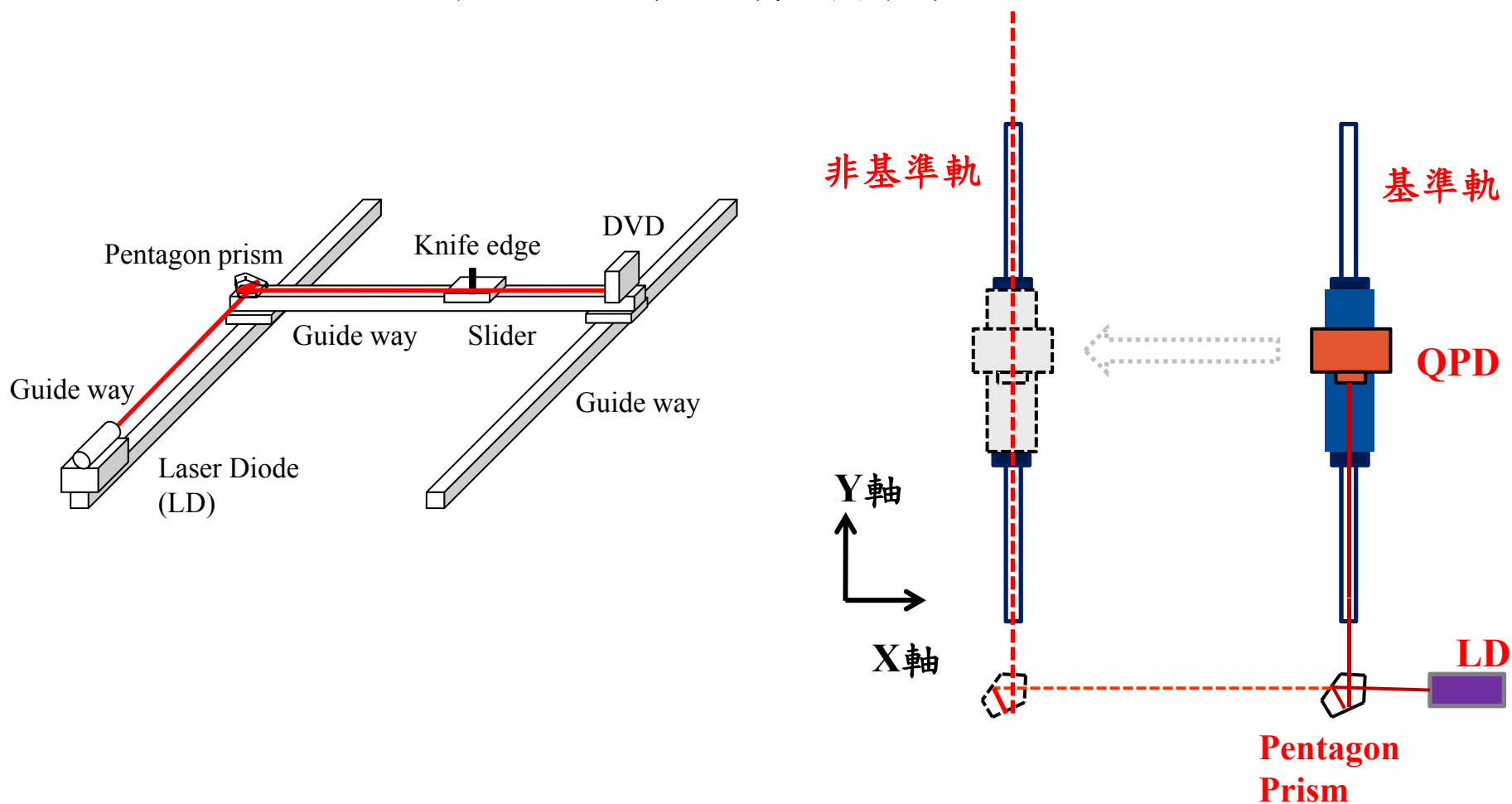
光感測器愈低愈準，否則要做角度誤差補償

量測軸線要與被量測的移動軸線同軸

例二：兩線性導軌平行度調整

垂直度, 平行度組裝調校與檢測

用雷射法比現行的直角規與平行規好



線軌平行度造成的機台定位誤差

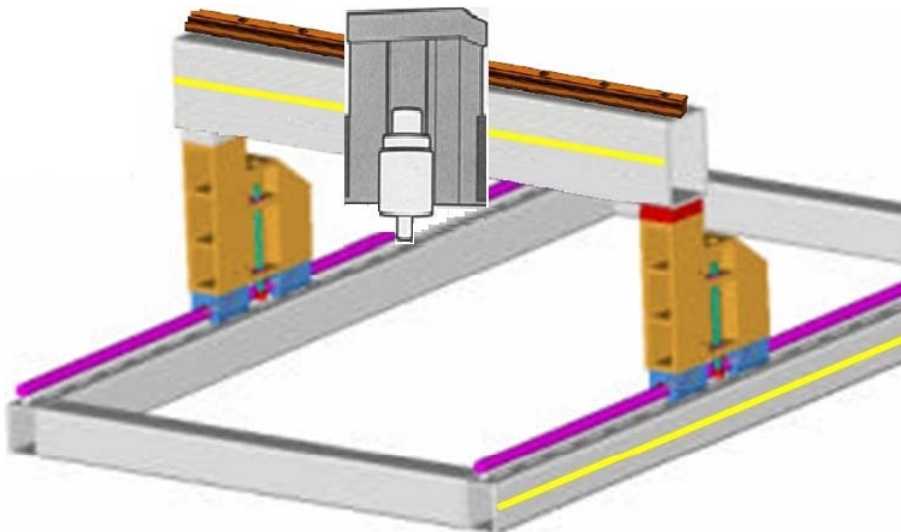
常見問題:

左右兩側軸向定位誤差相差80 μm 以上

$$\delta_x(x) = -Y \times \varepsilon_z(x)$$

Y: 離光學尺的阿貝偏位

$\varepsilon_z(x)$: 橋架移動時的Yaw error



問題來源:

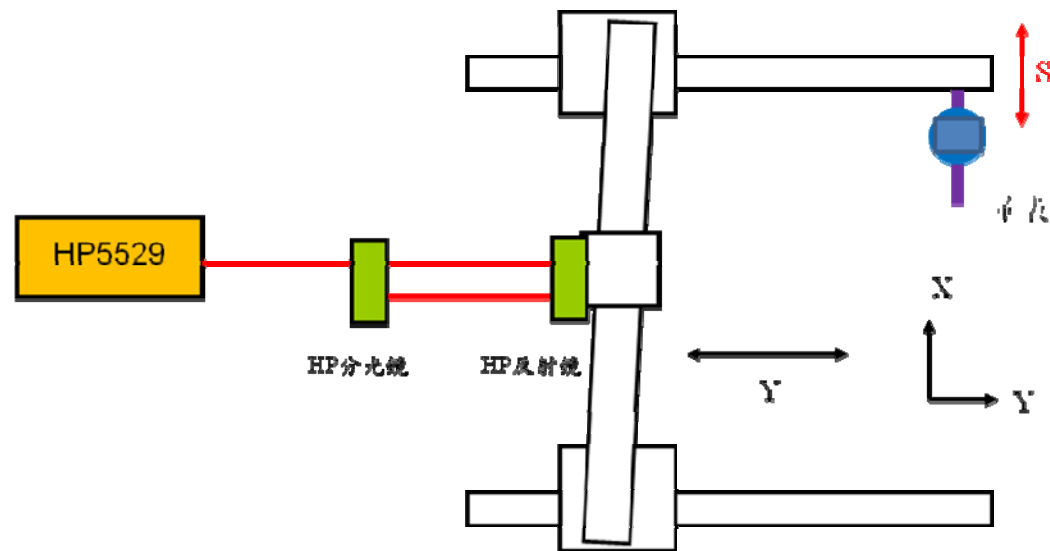
機台組裝時的左右導軌直線度與平行度沒調整好

問題探討:

導軌平行度應如何調整?

平行度造成的機台定位誤差

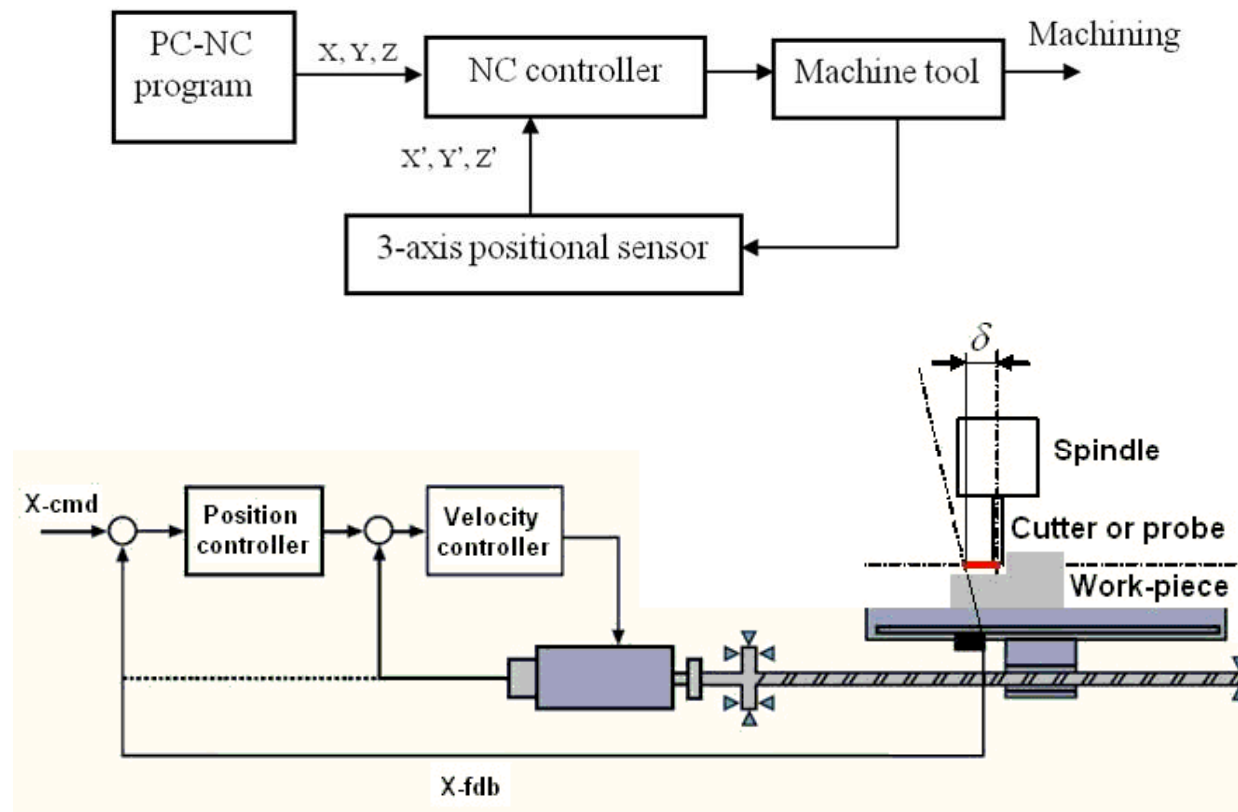
還是有Yaw角度誤差存在



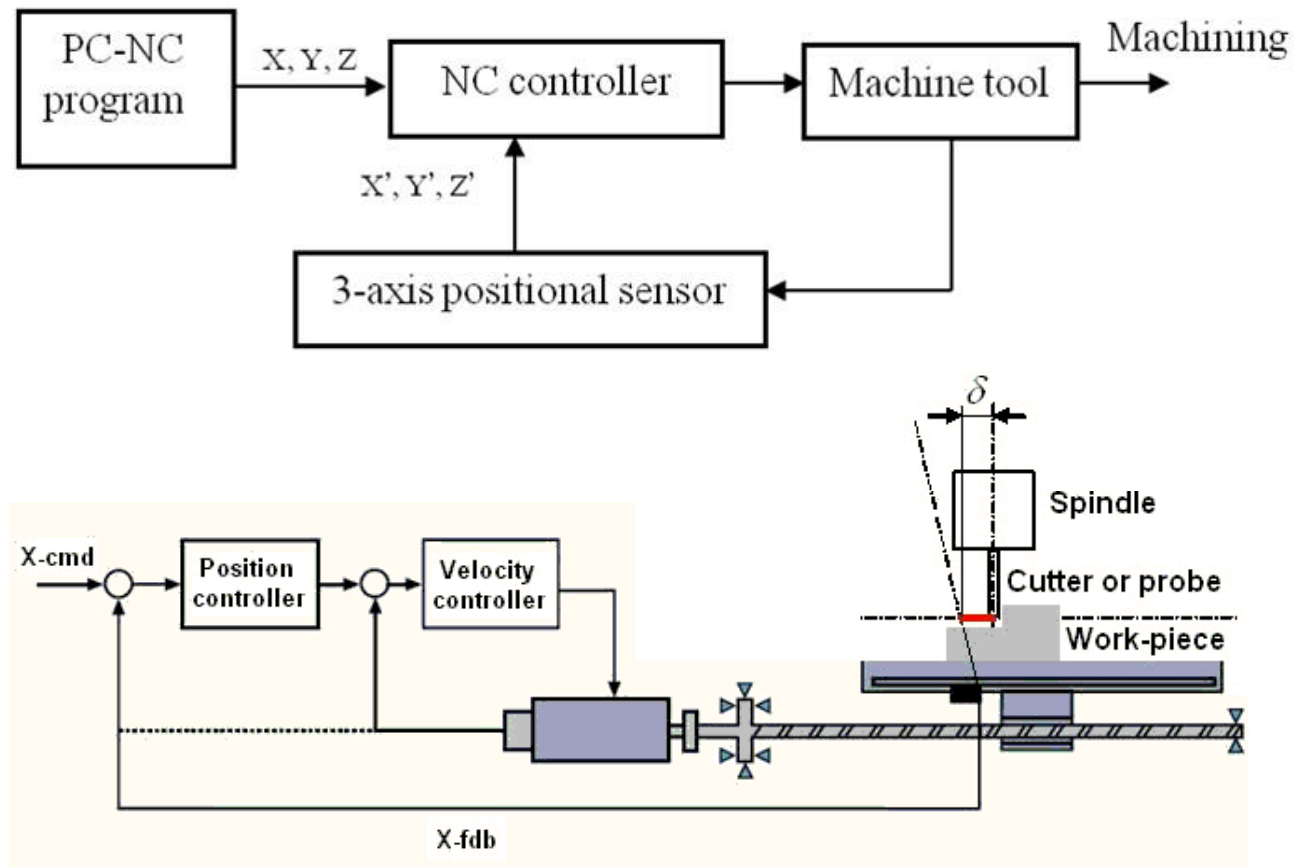
正確方法: 調整兩線軌的Yaw角度

例三：定位精度不佳問題

目前工具機位置控制迴路問題：
迴授點並非指令點：違背阿貝誤差原理



目前工具機位置控制迴路

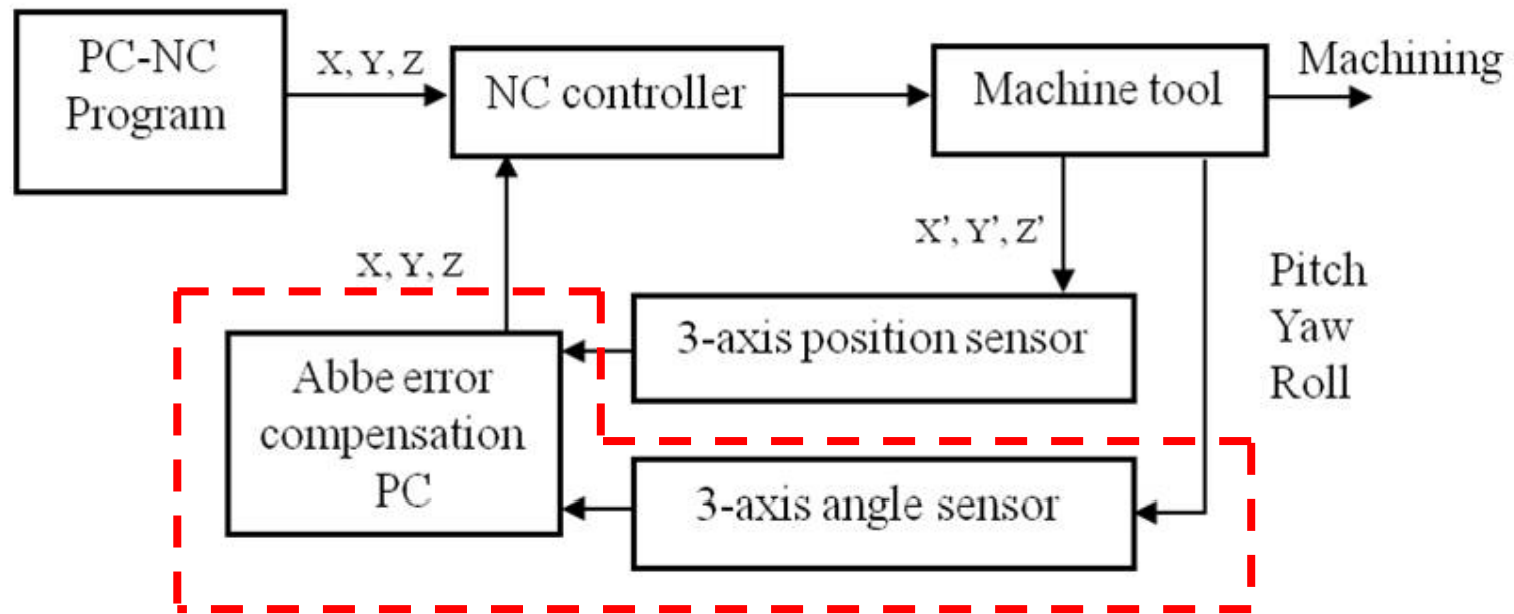


缺點：

工具機無可避免阿貝誤差

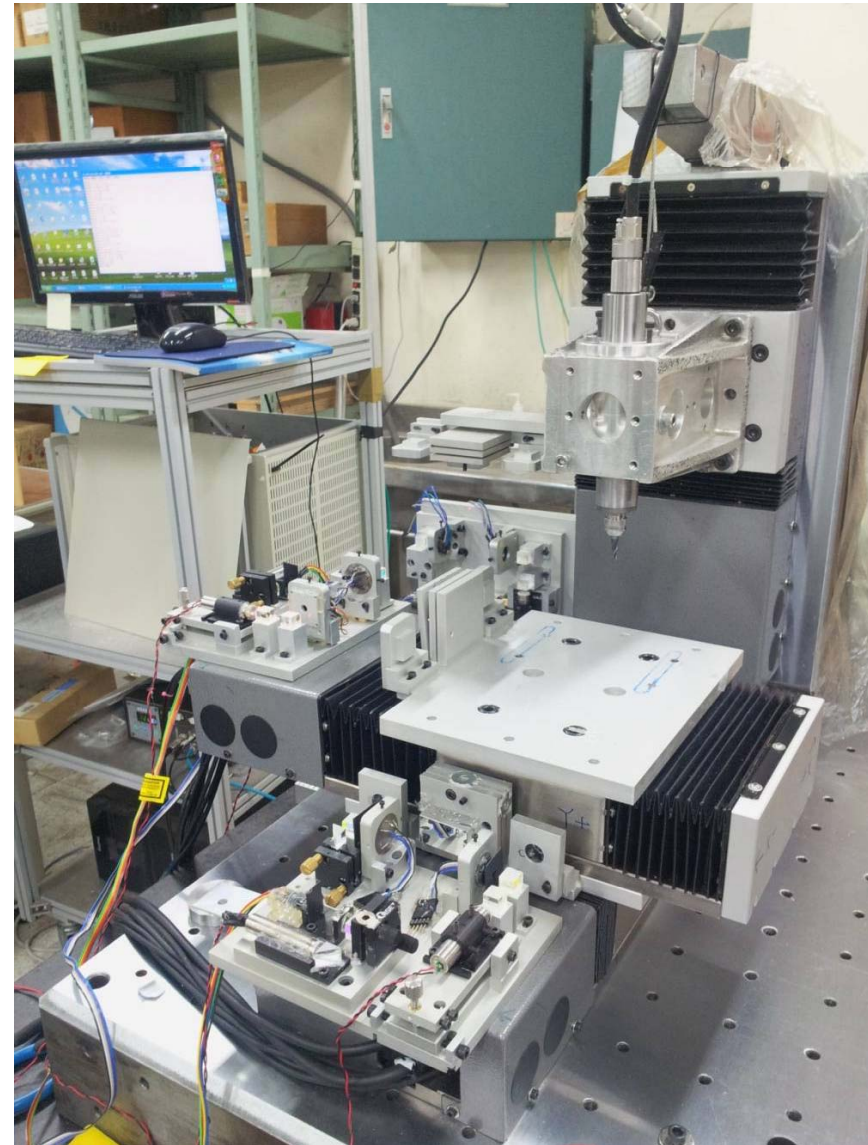
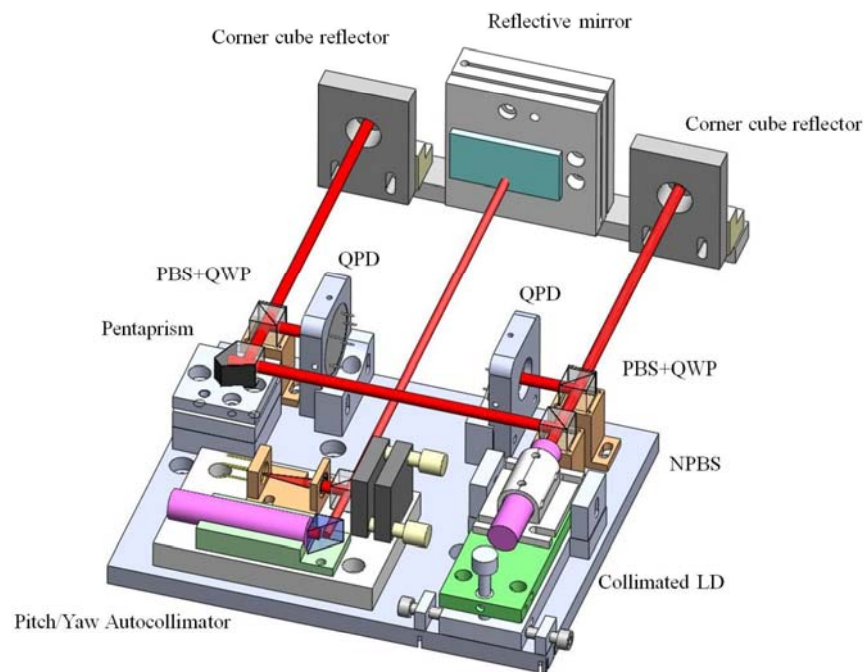
利用位移感測點來回饋加工點指令是不正確的

建議工具機位置控制迴路

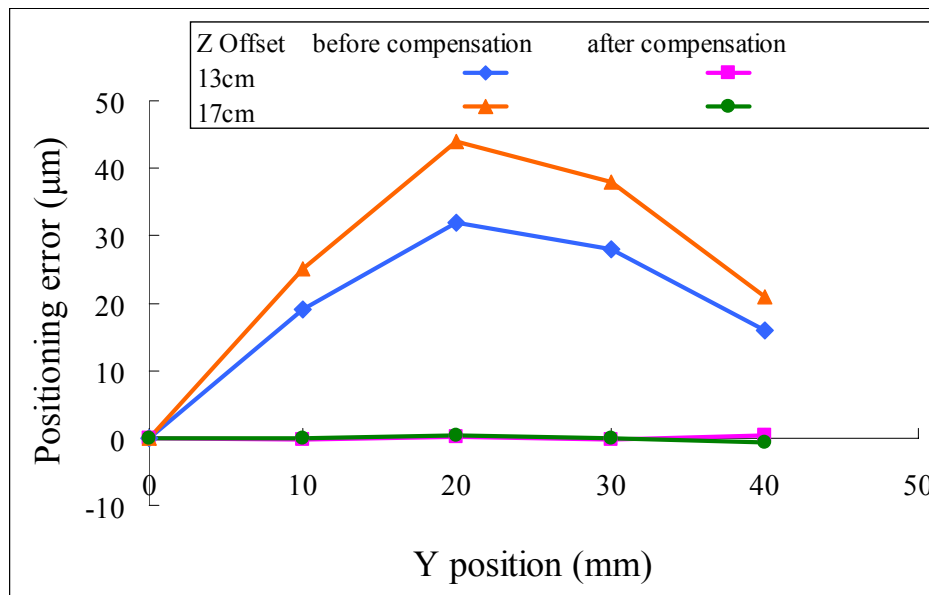


差異處：必須增加角度感測器、阿貝誤差補償器

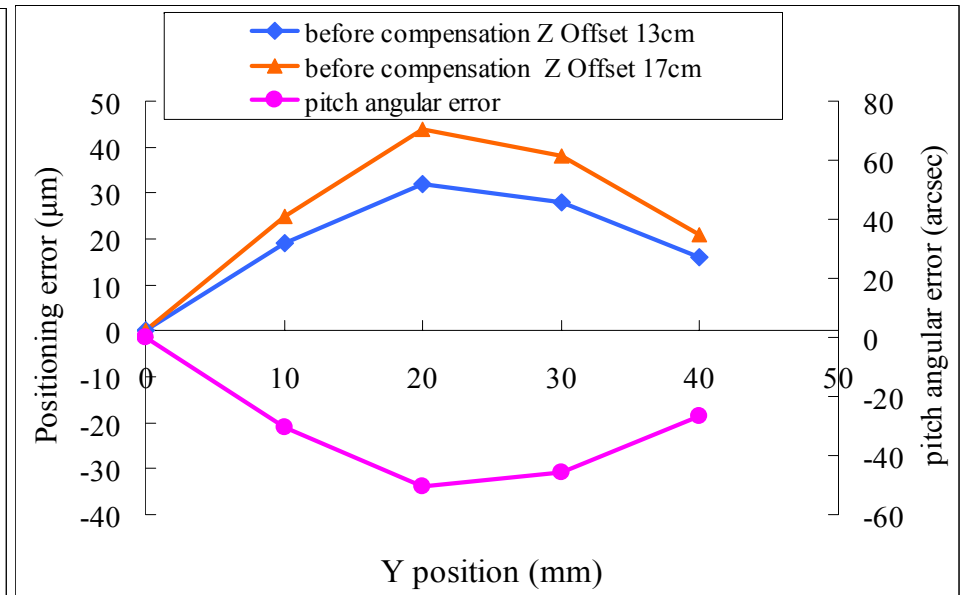
三角度感測器



Experiment of Z-Offset Effect on Y axis



定位誤差補償前後結果



定位誤差與pitch角度關係

精密機械與資訊工程關係

傳統型



智慧型



結論

精密機械技術必需從基礎問題上改進

還有很多基礎問題有待研究改進

鏟配問題

熱變形抑制與補償問題

旋轉軸定位誤差問題

液靜壓軸承問題

智能化問題

.....