

線上彩色共焦精密顯微形貌掃描量測系統之發展

Development of an In-situ Chromatic Confocal Measuring System for Precision Microscopic Surface Profilometry

陳亮嘉、林章民、林世聰、阮忠德

Liang-Chia Chen, Chang-Min Lin, Shyh-Tsong Lin, Duc-Trung Nguyen

在本文中，運用線型顯微彩色共焦量測原理，其利用寬帶光源結合自行研發的彩色色散物鏡，建立線掃描 (line scan) 寬帶波長共焦數學模型，以產生波長準確映射到量測深度之轉換關係。同時，本研究重點在於整合發展一套彩色共焦探頭與三軸精密掃描系統，對量測系統的 21 項體積誤差進行量測與校正，並進行最佳化之精密機構設計與調校，使掃描系統之體積誤差能維持在一個精準的等級。經由實際量測的驗證，經過精密校正機構之量測與校正，系統在驗證標準階高塊的重覆度，其在一個可量測範圍 (field of view, $275 \times 275 \mu\text{m}^2$) 內，其量測標準差可維持在次微米等級的量測水準。同時，所研製設備具有對工業微元件三維形貌進行實測之能力，由各類微結構三維形貌實例之量測結果分析中，可驗證其量測結果的精確度可以達到次微米等級。

This article presents the development of an in-situ chromatic confocal line-scan measuring system using wavelength-resolved chromatic confocal principle and the analysis and optimization of volumetric errors of the developed measuring platform to achieve one-shot and high-accuracy microscopic surface profilometry in an integrated three-axis scanning instrument. Optical confocal measurement for microscopic surface profilometry has become extremely important due to its high longitudinal measurability range and excellent vertical resolution. A chromatic confocal probe employing broadband light as well as a chromatic dispersion objective is integrated with a 3 axis scanning platform to establish *in-situ* 3-D profile measurement in one-shot manner. The developed confocal system is designed and analyzed to characterize the system volumetric errors, such as positioning errors, angular deviation, moving straightness and squareness between the three axes. It is implemented by measuring and analyzing of 21 volumetric errors in 3-axis system for system optical alignment and installation, thus the volumetric errors can be minimized by optimal machine alignment and integration. Our experimental tests on standard targets have verified that the developed system can perform the measurement precision with one standard deviation to be controlled within $0.1 \mu\text{m}$. Some industrial parts, such as semiconductor wafers, have been also verified with its effectiveness in sub-micro scale measurement and reconstruction of 3-D microscopic surface profiles.

一、前言

三維光學形貌量測技術具有量測速度快、量測精度高、不會損傷物體等優點，深受工業界重視，彩色共焦顯微技術在國內外已發展一段時間，一般在物體的三維表面形貌量測技術上，已有相當的成熟度，而且國內外已有販售線掃描彩色共焦相關的應用產品，不過目前均僅限於離線品管的量測儀器，能整合到線上多軸三軸掃描檢測系統的產線量測設備並不多見，在國內更還未有此技術或成熟精密形貌量(檢)測設備之發展。因此，在本文中描述如何整合門型花崗石基座、高精度 X-Y 平台、彩色共焦顯微探頭以及 Z 軸對焦掃描模組，以發展成一套線上彩色共焦精密形貌掃描量測儀器。研發之重點將在整體掃描量測系統之設計以及其掃描平台的掃描量測精度的最佳化工程技術重點上。

二、線型 (Line Scan) 彩色顯微共焦量測之原理

線型共焦成像原理，共焦顯微術中擴散函數代表光強訊號之分布，線型共焦顯微術有狹縫作為空間濾波，數學式可表示為⁽¹⁾：

$$i(v, w, u) = |h(v, w, u)|^2 \left\{ s(v) \otimes |h(v, w, u)|^2 \right\} \quad (1)$$

其中 $i(v, w, u)$ 為感測器接收到之光強訊號， $s(v)$ 為線偵測器， $h(v, w, u)$ 為擴散函數。

$h(v, w, u)$ 擴散函數經過實際聚焦於透鏡後可表示為：

$$h(v, w, u) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(\xi, \eta, u) \exp[j(\xi v + \eta w)] d\xi d\eta \quad (2)$$

$p(\xi, \eta, u)$ 為透鏡之孔徑函數，可改寫成為：

$$p(\xi, \eta, u) = \exp\left[\frac{1}{2}ju(\xi^2 + \eta^2)\right] \text{circ}(\xi^2 + \eta^2)^{1/2} \quad (3)$$

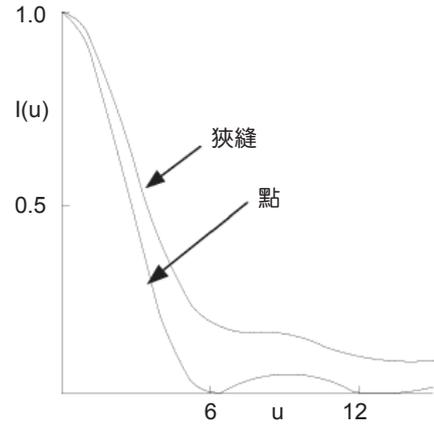


圖 1. 點共焦與線共焦縱向反應曲線之比較。

若量測僅考慮徑向之訊號，而單點感測器在原點， $(v = 0, w = 0)$ 接收到光強訊號大小隨著物體縱向變化改變，式 (3) 可進一步化簡為：

$$i(u) = \int_0^1 \left| \int_0^{(1-\xi^2)^{1/2}} \exp(ju\eta) d\eta \right|^2 d\xi \quad (4)$$

由上面的物理式的推導，可了解光學切片能力為共焦法之優勢，亦代表其量測系統之縱向解析度較傳統顯微鏡來得優良，線型共焦系統之深部反應曲線 (depth response curve) 可表示為：

$$i(u) = \frac{\pi}{2u} \left\{ C^2 \left(\frac{2u}{\pi} \right)^{1/2} + S^2 \left(\frac{2u}{\pi} \right)^{1/2} \right\} \quad (5)$$

其中， u 為正規化之縱向光學座標， C 及 S 為菲涅耳積分 (Fresnel integral)，其縱向反應曲線與點共焦之比較，如圖 1 所示，由半寬高可得知線共焦之縱向反應曲線稍差於點共焦系統，但其量測效率可由單點進步為線性多點方式，量測效率可大幅增加，其效率一般可增加 10 至 100 倍之範圍。

使用線狹縫及線偵測器，評估線型共焦系統性能，假設光點於聚焦平面時，可得像平面的橫向強度之線型共焦橫向鑑別率分布為⁽²⁾：

$$i(v, w) = \left(\frac{2J_1(v^2 + w^2)^{1/2}}{(v^2 + w^2)^{1/2}} \right)^2 \left(\frac{\sin w}{w} \right)^2 \quad (6)$$

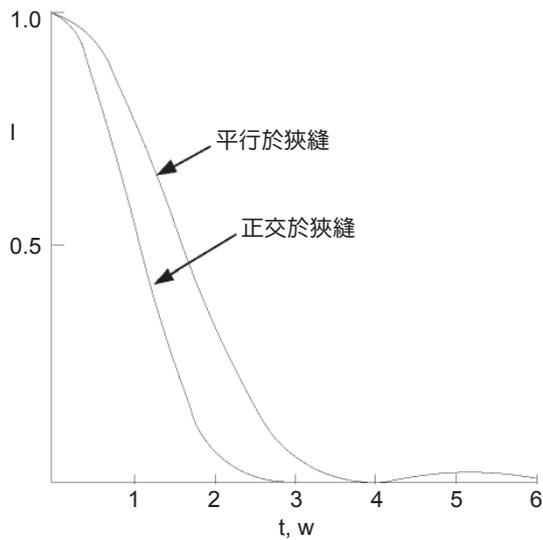


圖 2. 正交及平行於狹縫方向之光強響應比較示意圖。

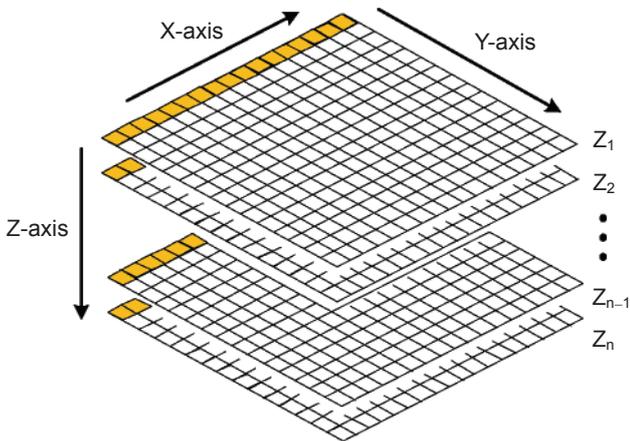


圖 3. 線顯微共焦量測之三維成像原理。

此狹縫方向平行於 y 軸，剖面強度如所圖 2 所示，正交於狹縫方向之響應幾乎優於使用針孔之傳統點共焦系統，但於平行於狹縫方向之響應卻與一般光學系統相仿，如此將使得狹縫共焦橫向解析度

不如點共焦量測系統，且於平行狹縫方向易引入雜光，惟光源之光強使用率及檢測速度上仍具有相當大之優點。

線顯微共焦系統之三維成像原理，如圖 3 所示，進行縱向深度掃描，由於其為線光源及線偵測，因此可得到 x 方向像素點之多條縱向深度掃描響應曲線，經峰值偵測可得到待測物之剖面資訊，免除 x 方向之逐點掃描，經 y 方向之位移，即可重建待測物三維形貌，使掃描時間大幅縮減。

三、量測系統之設計

彩色共焦顯微術使用寬頻白光及折射式色散技術，延伸聚焦點使寬頻光源不同波長聚焦在不同深度之效果，讓聚焦點使軸向延伸，取代傳統單點共焦需要軸向掃描之程序，如圖 4 所示。

彩色共焦顯微術利用寬頻光源通過色散物鏡，產生軸向色散使不同波長聚焦在不同深度，若待測物表面高度位於光譜 λ_n 聚焦位置，光譜反射經由濾波器線狹縫濾除雜散光，再由光譜儀分析入射光譜成分，藉由聚焦位置即可知道聚焦波長。圖 5 為彩色共焦顯微術架構示意圖⁽³⁻⁷⁾。

傳統單點共焦顯微術需要深度掃描，逐點掃描並記錄下光強值，聚焦反應曲線為光強和縱向位置之關係，但彩色共焦顯微術藉由折射式色散物鏡使波長位置取代深度位置，所以波長和深度位置需要透過校正程序可得知關係，原理採用全反射之一個參考標準平面，進行系統之深度掃描，逐點記錄下深度位置及波長之關係，使用曲線擬合法或查表法 (look-up table) 建立參照，實際量測待測物時所獲得之波長，透過校正曲線即可換算得到實際深度資訊，如圖 6 所示。

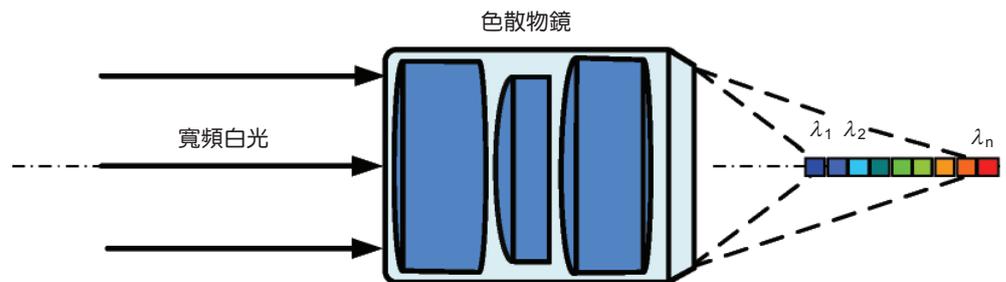


圖 4. 折射式色散物鏡示意圖。

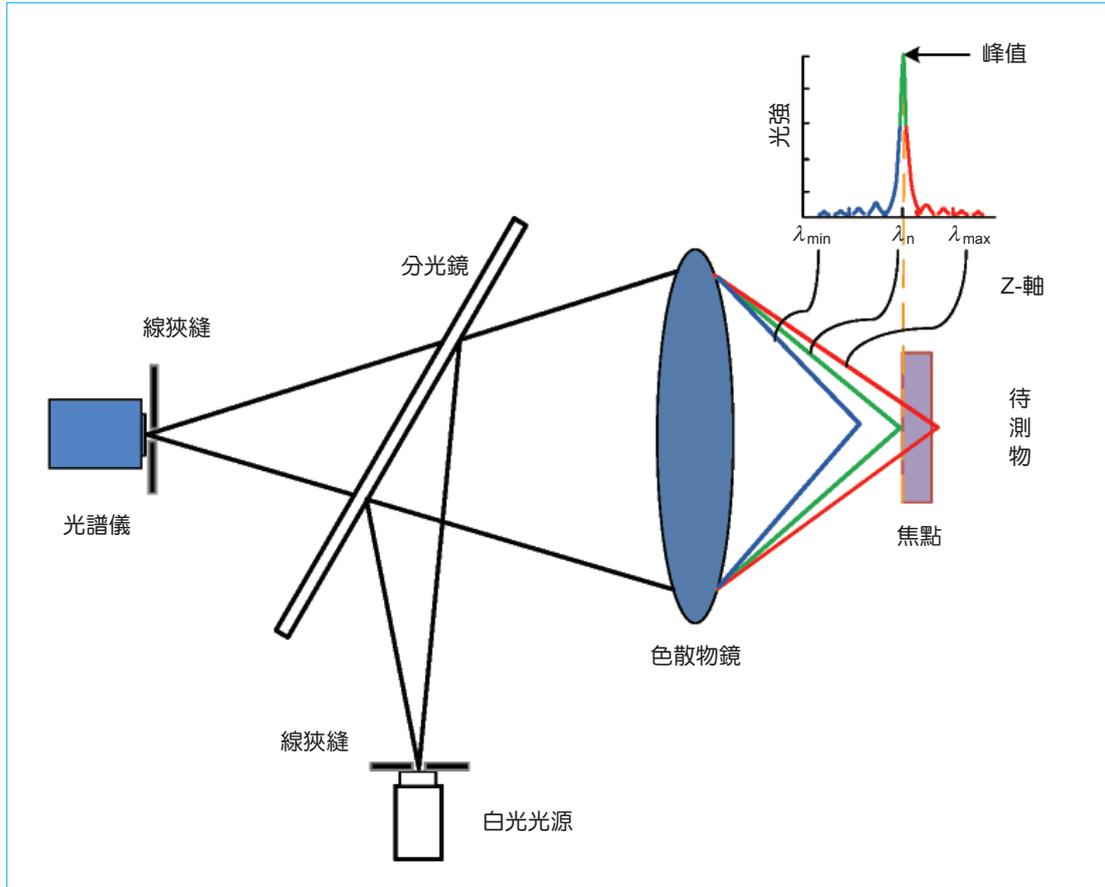


圖 5. 彩色共焦顯微術示意圖。

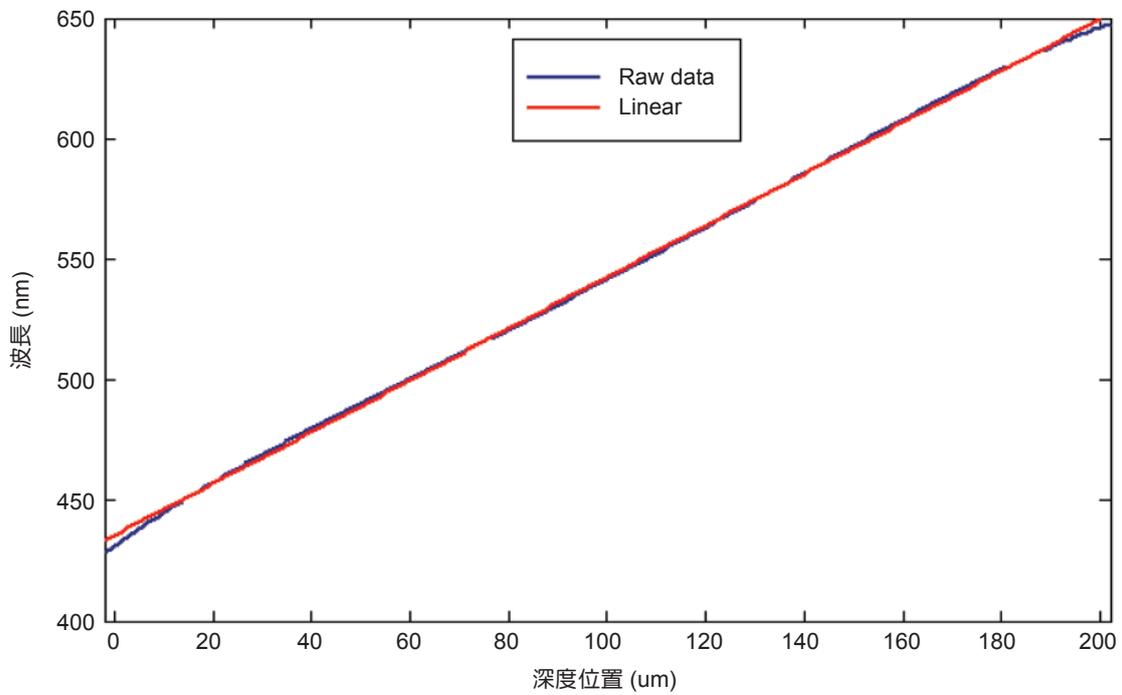


圖 6. 色散物鏡之校正曲線。

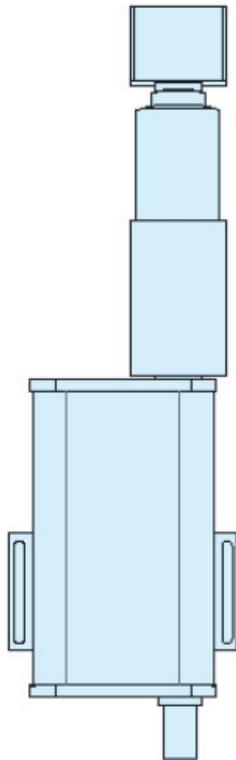


圖 7. 探頭組合完成之示意圖。

在本研究中所用的量測系統是以可見光光源為系統之投射光源，使用 100 瓦之氙燈 (xenon lamp) 光源、導引光源之光纖、圓柱透鏡、狹縫空間濾波器，系統本體採用實驗室自行開發之物像共焦顯微架構，包含了直角鏡、分光鏡、鏡筒稜鏡、色散物鏡、線狹縫入射影像式光譜分光模組，取像則使用光電耦合裝置。整合完成之探頭示意，就如圖 7 所示。

整體量測系統之設計示意如圖 8 所示。利用量測系統各元件的組成，可以構成一套線型彩色共焦顯微形貌量測的探頭。

四、三軸精密掃描平台之整合、製作與測試

1. 掃描平台之整合方法

首先將門型花崗石基座 (圖 9 中之 4) 固定在鐵架 (圖 9 中之 5) 上，接著把 X-Y 平台 (圖 9 中之 3) 固定在花崗石基座上，藉由精密量表，將 X-Y 平台校正至與門型花崗石基座平行，再進行 Z 軸模

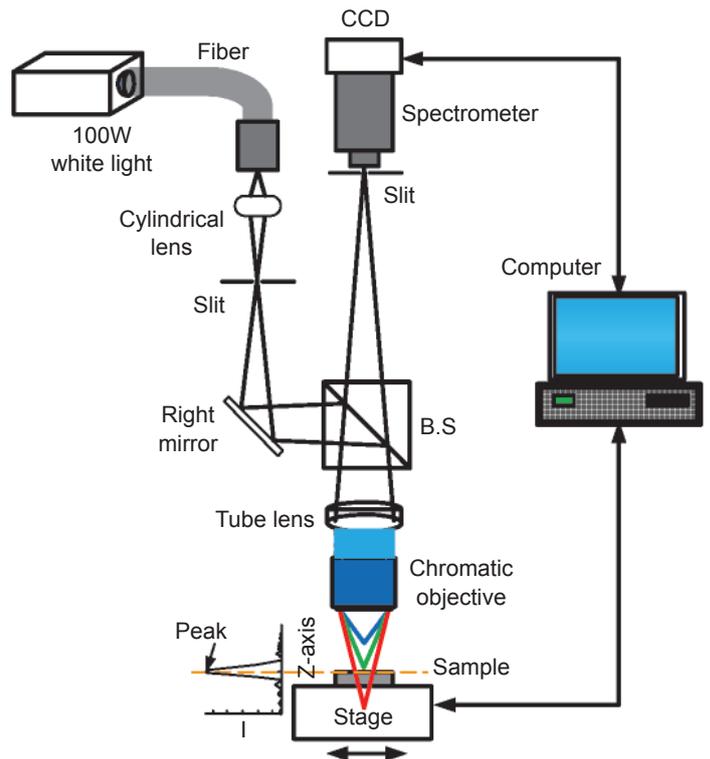


圖 8. 線型彩色共焦系統設計圖。

組之上下移動 (圖 9 中之 1)，固定在門型花崗石基座的橫樑上，由於 Z 軸上下移動模組在設計時，背板就銑成 L 型並加以研磨，以作為為精密定位使用。因此，可藉由 Z 軸上下移動模組的背板，定位於門型花崗石基座的上面，如此便可精密定位完成。再將探頭 (圖 9 中之 2) 固定到 Z 軸上下移動模組上，以正確定位到兩邊的定位銷，再調整探頭到正確高度位置，如此可以完成量測探頭的精密定位工作。

圖 10 為所研發之線上彩色共焦精密顯微形貌掃描量測儀實際完成之實體圖，在搭配控制電路與控制程式之下，將被測物固定於 X-Y 平台上，以利達成自動線上物體三維表面形貌之量測與重建工作。

2. X 軸體積誤差之量測分析

(1) X 軸定位誤差量測

X 軸定位誤差量測之硬體架設，如圖 11 所示，將微型角隅稜鏡干涉儀架設在花崗石基座上 (圖 11 中的 1)，並將反射鏡 (圖 11 中的 2) 固定於

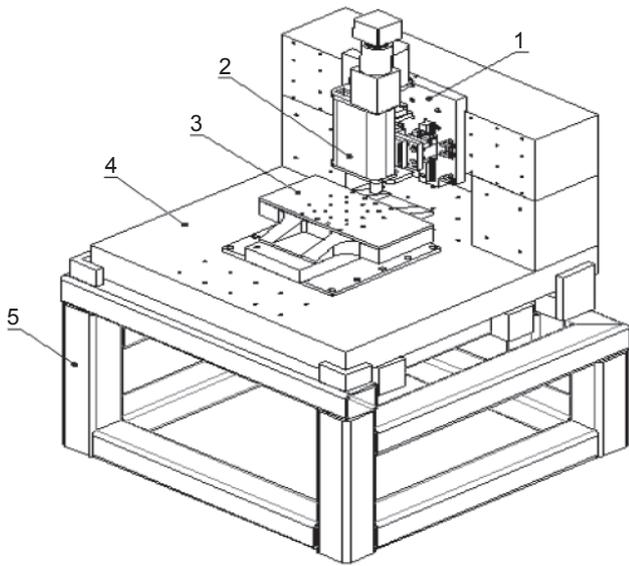


圖 9. 線上彩色共焦量測機台之硬體架構圖。

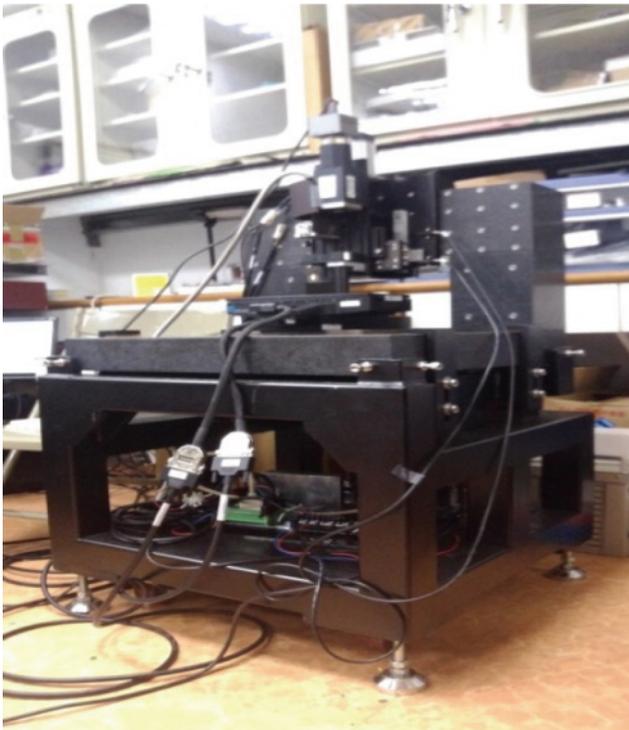


圖 10. 線上彩色共焦精密顯微形貌掃描量測儀實體圖。

X-Y 平台上。由於 X 軸量測的總行程為 130 mm，因此將量測點設定為 10 個點，移動到量測起始點後，每次移動 13 mm，並重覆進行 3 次的量測，以獲得如圖 12 所示的 X 軸定位誤差曲線圖。

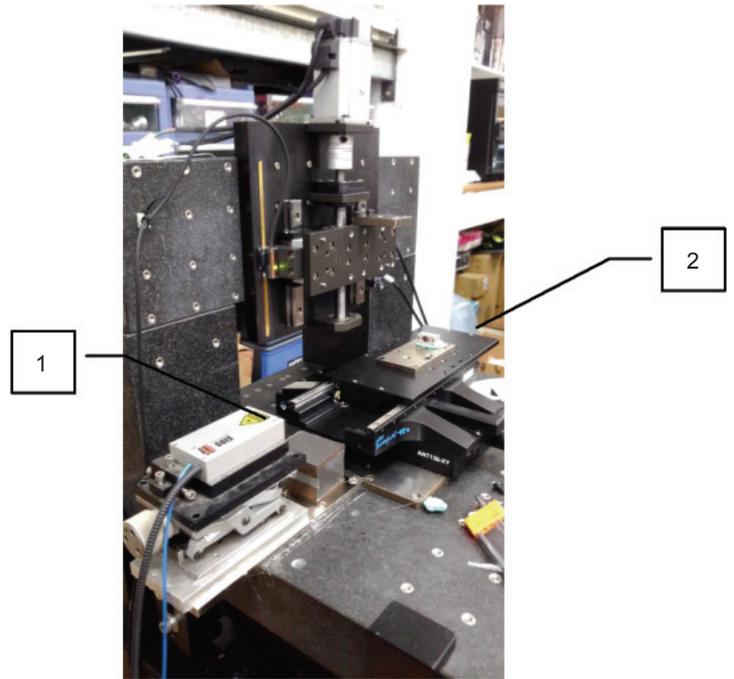


圖 11. X 軸定位誤差量測硬體架設圖。

從曲線圖 12 中可以看出，X 軸定位誤差的_{最大}誤差值，則出現在移動到 130 mm 位置時有 7.8 μm 的誤差值。

(2) X 軸直線度誤差量測

X 軸直線度誤差量測之硬體架設，如圖 13 所示，將視準儀架設在花崗石基座上 (圖 13 中的 1)，並將雷射準直儀 (圖 13 中的 2) 固定於 X-Y 平台上。可獲得如圖 14 和圖 15 所示的 X 軸直線度誤差曲線圖。

從曲線圖 14 中可以看出，X 軸直線度誤差 (偏 Y 軸) 的_{最大}誤差值出現在移動到 13 mm 位置時，有 4.6 μm 的誤差值。同時，從曲線圖 15 中可以看出，X 軸直線度誤差 (偏 Z 軸) 的_{最大}誤差值出現在移動到 13 mm 位置時，有 0.9 μm 的誤差值。

(3) X 軸俯仰誤差量測

X 軸俯仰誤差量測之硬體架設，如圖 16 所示，將視準儀架設在花崗石基座上 (圖 16 的 1)，並將反射鏡 (圖 16 的 2) 固定於 X-Y 平台上，可測

X 軸定位誤差

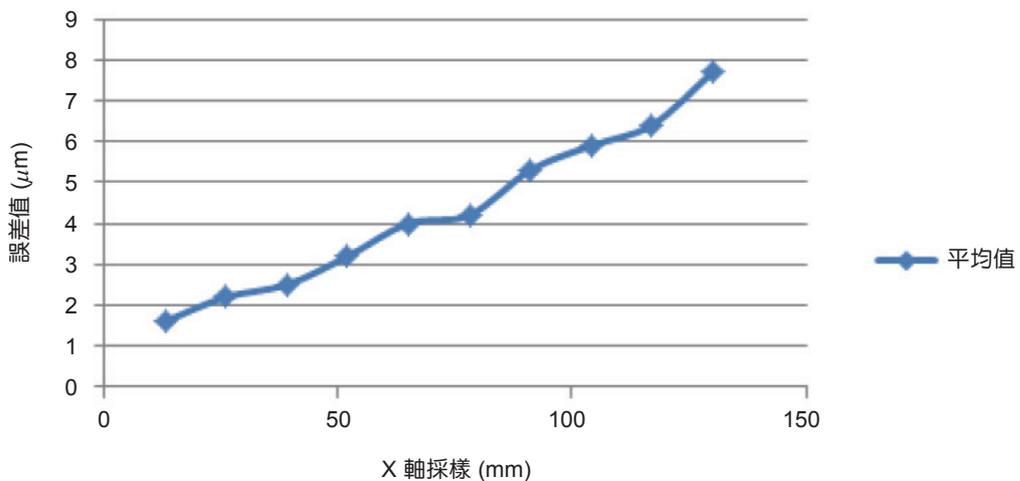


圖 12.
X 軸定位誤差之誤差平均值曲線。

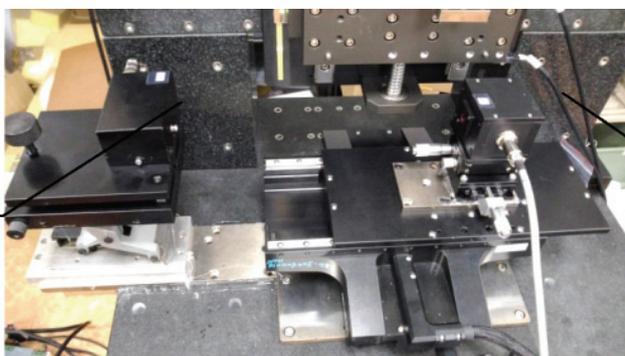


圖 13.
X 軸直線度誤差量測硬體架設圖。

X 軸直線度 (偏 Y 軸)

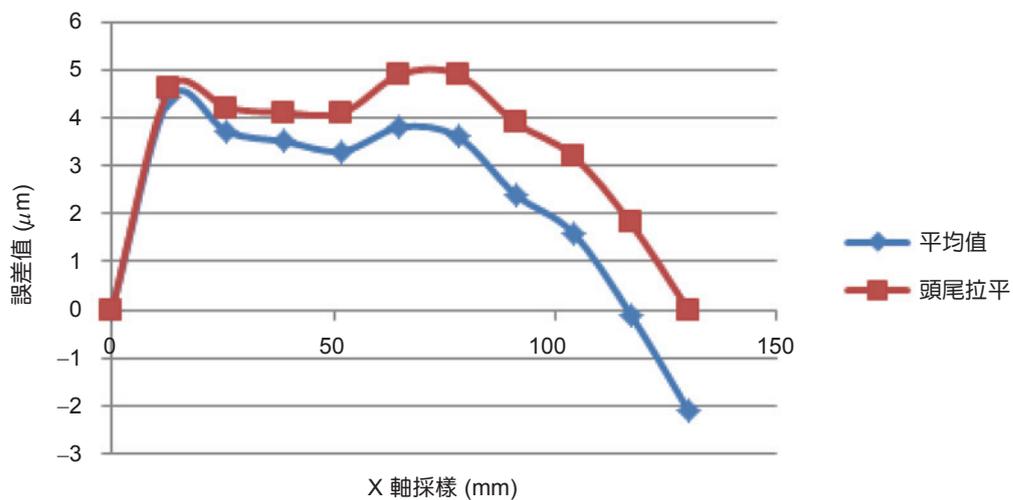


圖 14.
X 軸直線度誤差 (偏 Y 軸) 之誤差平均值曲線。

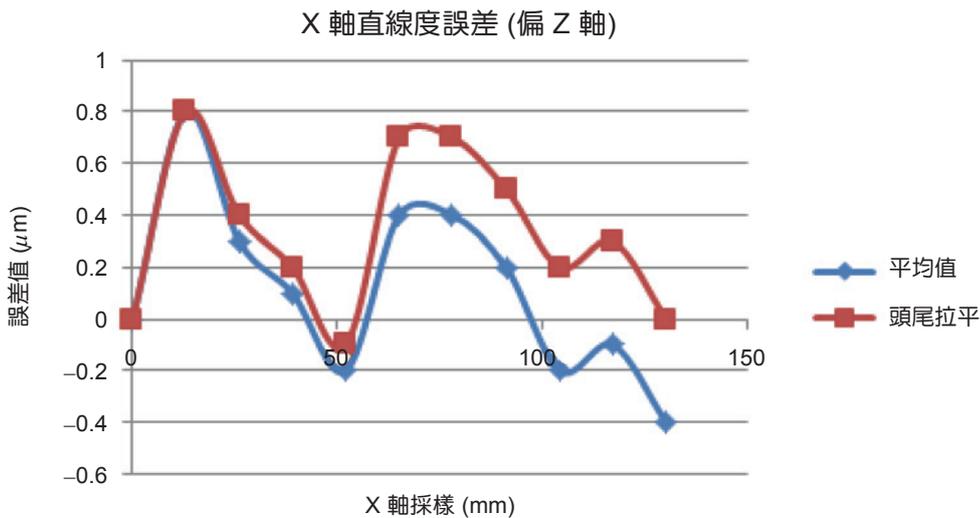


圖 15.
X 軸直線度誤差(偏 Z 軸)之誤差平均值曲線。

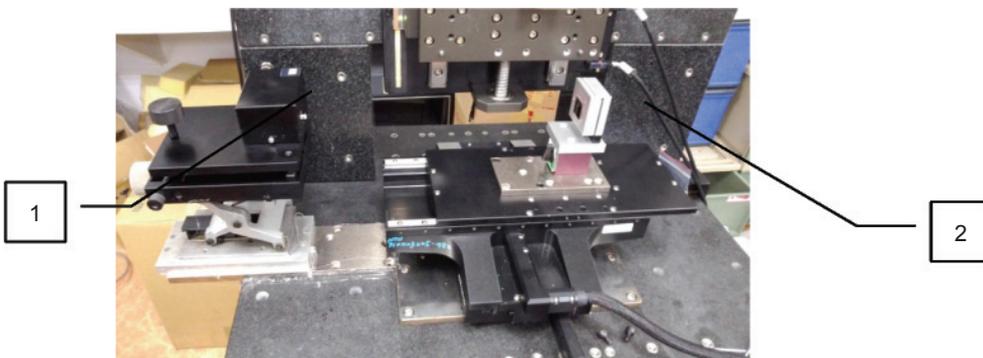


圖 16.
X 軸俯仰和側擺誤差量測硬體架設圖。

得到如圖 17 所示的 X 軸俯仰誤差誤差曲線。

從曲線圖 17 中可以看出，X 軸俯仰誤差的^{最大}誤差值出現在移動到 26 mm 位置時，有 -1.7 arc sec 的誤差值。

(4) X 軸側擺誤差量測

X 軸側擺誤差量測之硬體架設，如圖 16 所示，將視準儀架設在花崗石基座上 (圖 16 的 1)，並將反射鏡 (圖 16 的 2) 固定於 X-Y 平台上，可獲得如圖 18 所示之 X 軸側擺誤差曲線。

從曲線圖 18 中可以看出，X 軸側擺誤差的^{最大}誤差值出現在移動到 130 mm 位置時，有 -2.7 arc sec 的誤差值。

(5) X 軸滾動誤差量測

X 軸滾動誤差量測之硬體架設，如圖 19 所

示，將電子式水平儀 (圖 19 中的 1) 固定於 X-Y 平台上，可獲得如圖 20 所示之 X 軸滾動誤差曲線。

從曲線圖 20 中可以看出，X 軸滾動誤差的^{最大}誤差值出現在移動到 130 mm 位置時，有 24.5 arc sec 的誤差值，由此可看出平台漸漸向左方漸增偏轉至 24.5 arc sec，經分析評估發現，此乃為雙滑軌之間具有不平行度之狀況發生，或因位移控制不同步所造成的誤差現象。

(6) XY 軸垂直度誤差量測

X 軸和 Y 軸的垂直度誤差量測之硬體架設，如圖 21 所示，將準儀架設在花崗石基座上 (圖 21 的 1)，並將雷準直儀 (圖 21 的 2) 固定在 X-Y 平台上，再把五角稜鏡 (圖 21 的 3) 固定於 Z 軸模組上，接著可以 Y 軸為基準軸，因此將 Y 軸固定不動而移動 X 軸進行量測，可以獲得如圖 22 所示之

圖 17.
X 軸俯仰誤差之誤差平均值曲線。

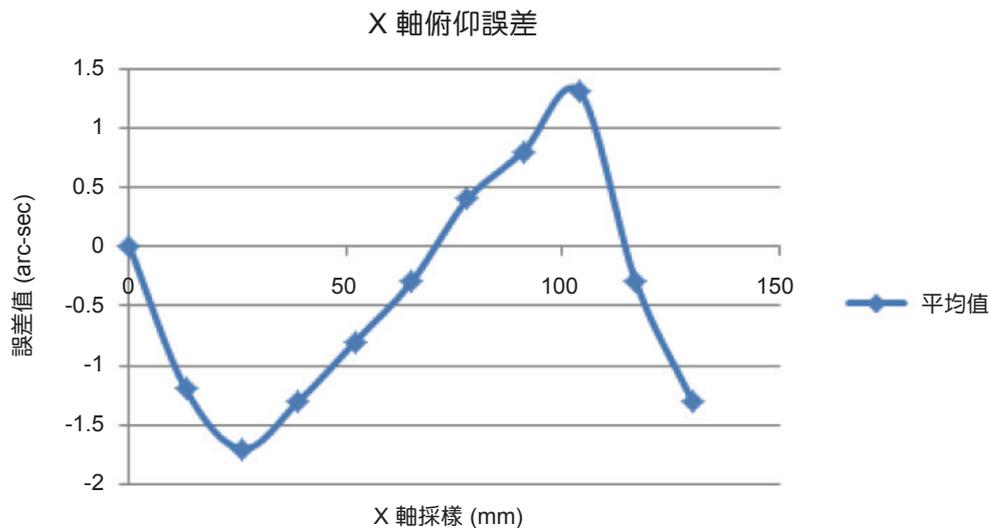


圖 18.
X 軸側擺誤差之誤差平均值曲線。

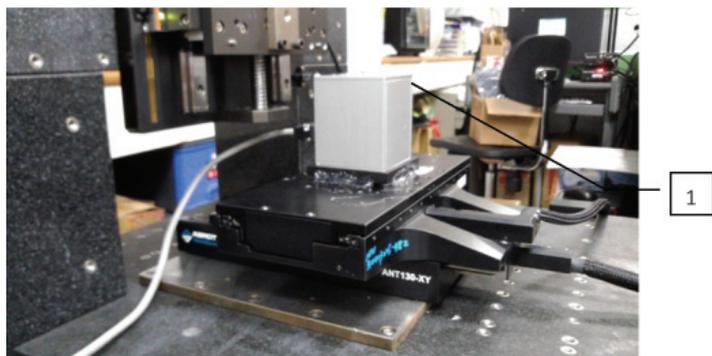
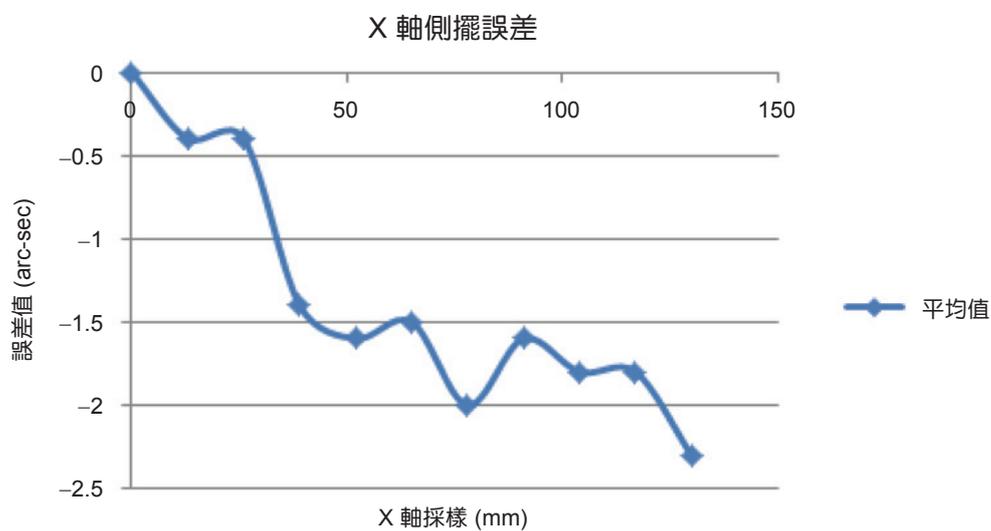


圖 19. X 軸滾動誤差量測硬體架設圖。

垂直度誤差曲線。

從曲線圖 22 中可以看出，X 軸和 Y 軸之垂直度誤差的最大誤差值出現在 Y 軸移動到 130 mm 位置時，其具有 $-5.3 \mu\text{m}$ 的誤差值。

(7) XZ 軸垂直度誤差量測

X 軸和 Z 軸垂直度誤差量測之硬體架設，如圖 23 所示，將視準儀架設在花崗石基座上 (圖 23 中的 1)，並將五角稜鏡 (圖 23 中的 2) 固定在 X-Y 平台上，接著把雷射準直儀 (圖 23 中的 3) 固定於 Z 軸上。量測時把 X 軸當成基準軸，因此 X 軸不動而移動 Z 軸。Z 軸量測的總行程為 50 mm，因此將量測點設定為 10 個點，移動到量測起始點後，

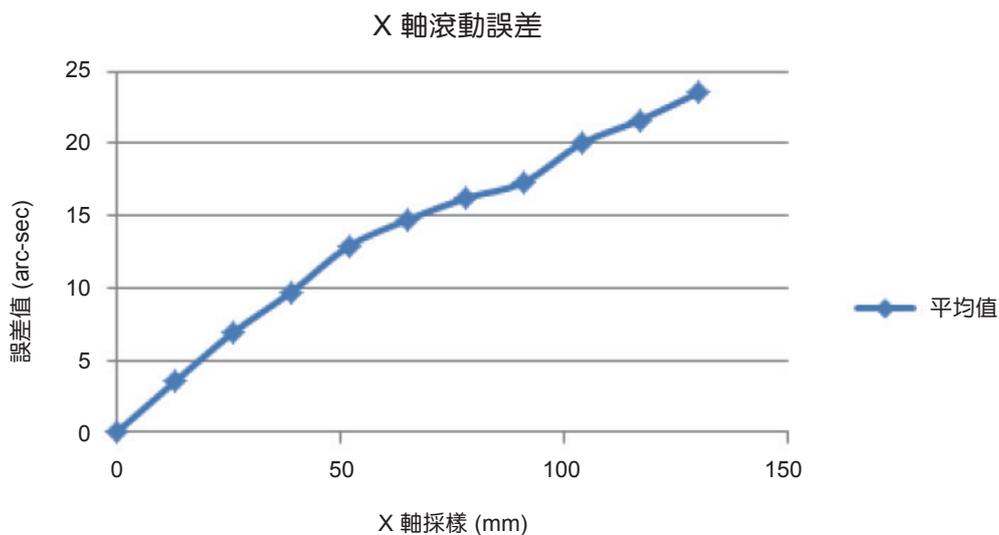


圖 20.
X 軸滾動誤差之誤差平均值曲線。

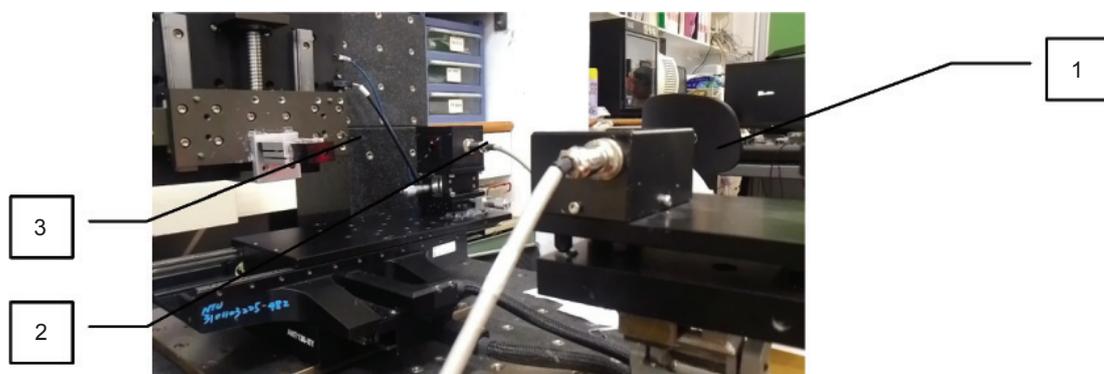


圖 21.
XY 軸垂直度誤差量測硬體架設圖。

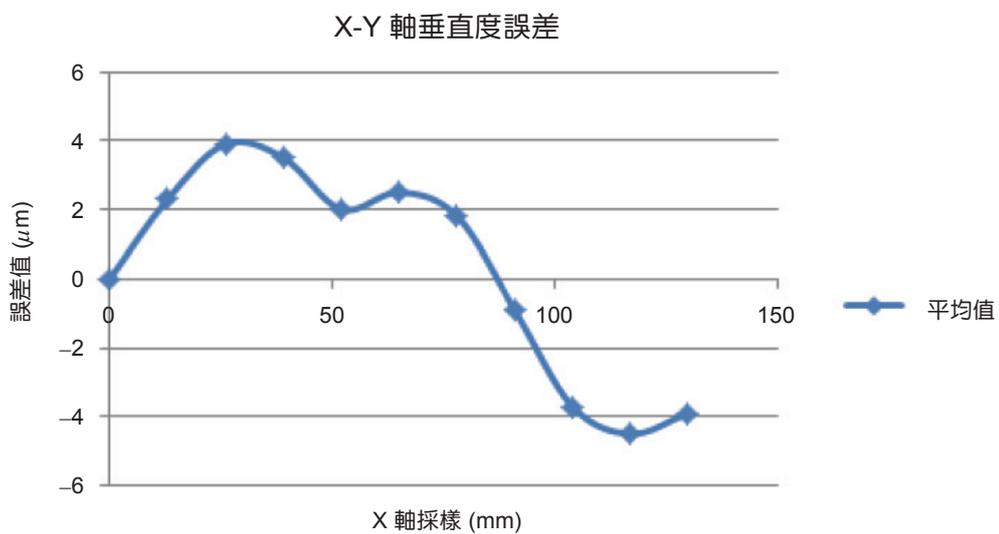


圖 22.
XY 軸垂直度誤差之誤差平均值曲線。

圖 23.
XZ 軸垂直度誤差量測硬
體架設圖。

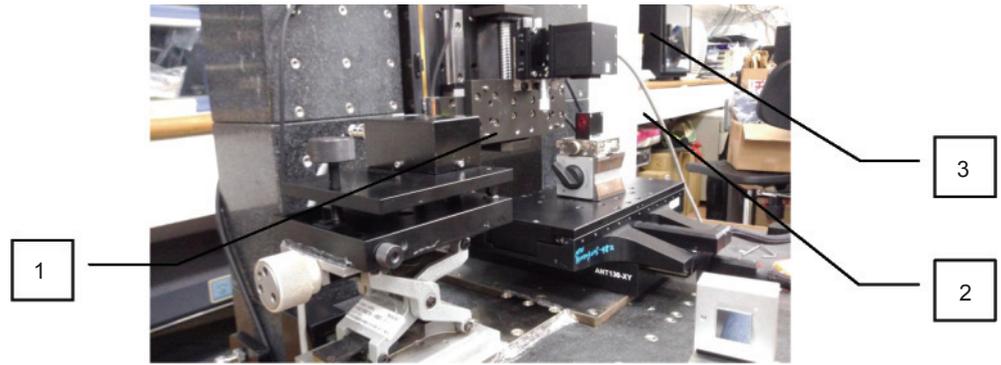
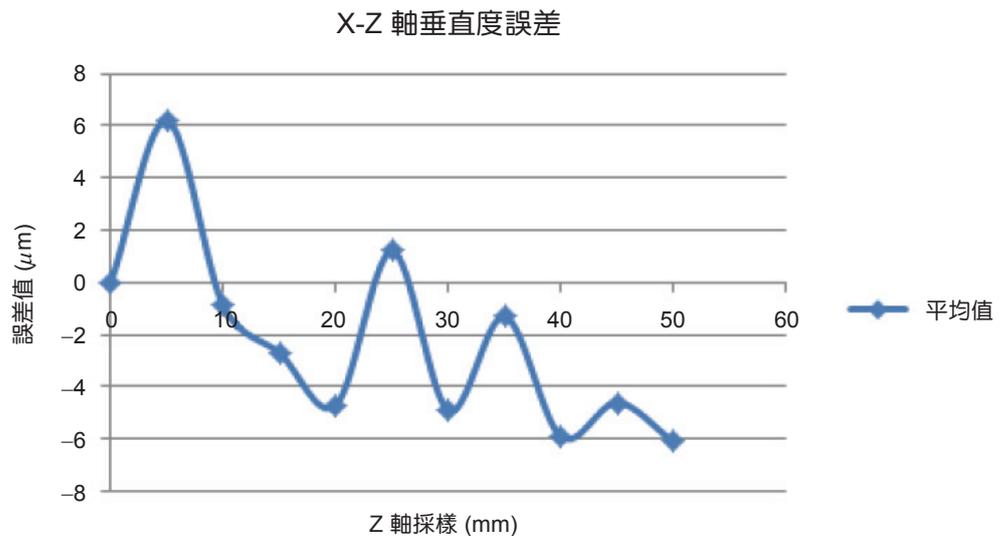


圖 24.
XZ 軸垂直度誤差之誤差
平均值曲線。



每次移動 5 mm，並重覆進行 3 次的量測，可獲得到如圖 24 所示的 XZ 軸垂直度誤差曲線。

從曲線圖 24 中可以看出，X 軸和 Z 軸之垂直度誤差的最大誤差值出現在 Z 軸移動到 5 mm 位置時，其具有 $6.2 \mu\text{m}$ 的誤差值。

3. Y 軸的體積誤差之量測與誤差分析

(1) Y 軸定位誤差量測

Y 軸定位誤差量測之硬體架設，如同量測 X 軸定位誤差的架設方式一樣，惟擺設的方向不同。由於 Y 軸量測的總行程為 130 mm，因此將量測點設定為 10 個點，移動到量測起始點後，每次移動 13 mm，並重覆進行 3 次的量測，可獲得如圖 25 所示的 Y 軸定位誤差曲線。從曲線圖 25 中可以看出，Y 軸定位誤差的最大誤差值出現在移動到 113 mm 位置時，其具有 $7.3 \mu\text{m}$ 的誤差值。

(2) Y 軸直線度誤差量測

Y 軸直線度誤差量測之硬體架設，如同量測 X 軸直線度誤差的架設方式一樣，惟擺設的方向不同。量測可獲得圖 26 與 27 的 Y 軸直線度誤差數據曲線圖。

從曲線圖 26 中可以看出，Y 軸直線度誤差 (偏 X 軸) 的最大誤差值出現在移動到 117 mm 位置時，有 $-3.7 \mu\text{m}$ 的誤差值；而從曲線圖 27 中可以看出，Y 軸直線度誤差 (偏 Z 軸) 的最大誤差值出現在移動到 78 mm 位置時，其具有 $6.6 \mu\text{m}$ 的誤差值。

(3) Y 軸俯仰誤差量測

Y 軸俯仰誤差量測之硬體架設，如同量測 X 軸俯仰誤差的架設方式一樣，惟擺設的方向不同，量測可獲得如圖 28 所示的 Y 軸俯仰誤差曲線。

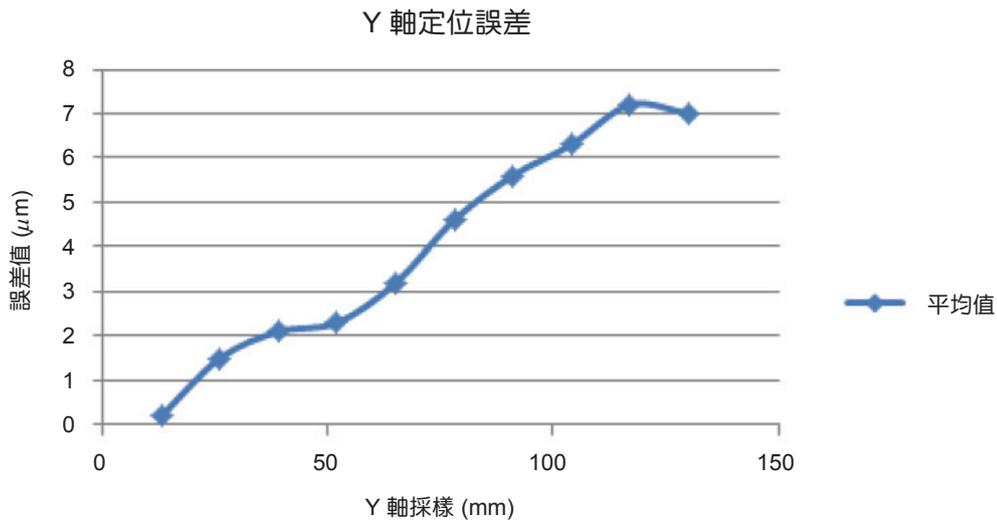


圖 25.
Y 軸定位誤差之誤差平均值曲線。

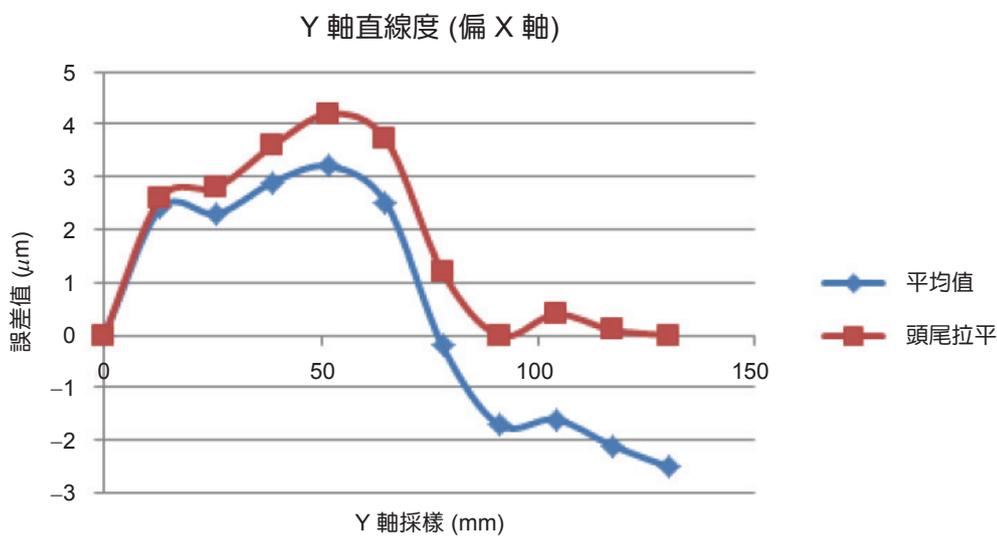


圖 26.
Y 軸直線度誤差 (偏 X 軸) 之誤差平均值曲線。

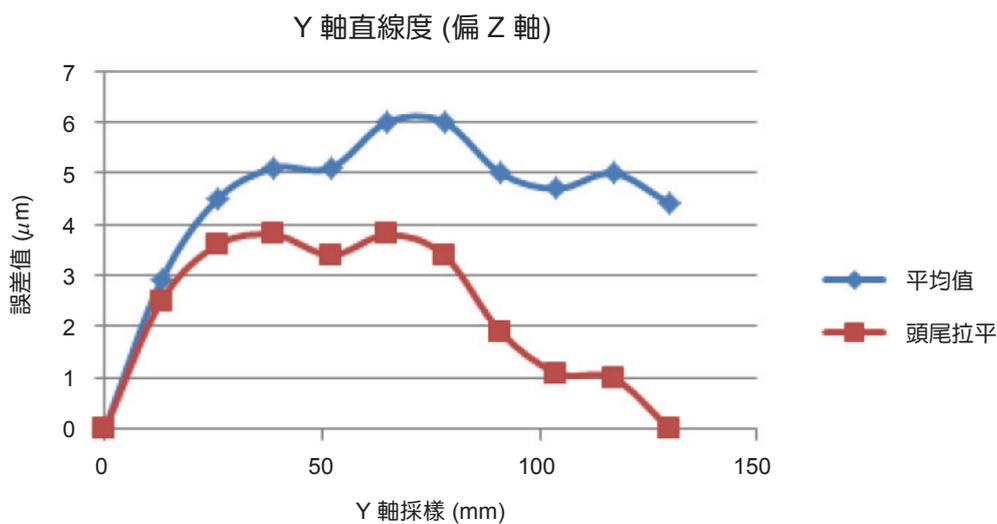


圖 27.
Y 軸直線度誤差 (偏 Z 軸) 之誤差平均值曲線。

從曲線圖 28 中可以看出，Y 軸俯仰誤差的
最大誤差值出現在移動到 39 mm 位置時，其具有
-4.6 arc sec 的誤差值。

(4) Y 軸側擺誤差量測

Y 軸側擺誤差量測之硬體架設，如同量測 X
軸側擺誤差的架設方式一樣，惟擺設的方向不同，
量測可獲得如圖 29 所示的 Y 軸側擺誤差曲線。從
曲線圖 29 中可以看出，Y 軸側擺誤差的最大誤差
值出現在移動到 104 mm 位置時，其具有 -1.1 arc
sec 的誤差值。

(5) Y 軸滾動誤差量測

Y 軸滾動誤差量測之硬體架設，如同量測 X
軸滾動誤差的架設方式一樣，惟擺設的方向不同。

量測完成可獲得如圖 30 所示的 Y 軸滾動誤差數據
曲線。從曲線圖 30 中可以看出，Y 軸滾動誤差的
最大誤差值出現在移動到 120 mm 位置時，其具有
-4.25 arc sec 的誤差值。

(6) YZ 軸垂直度誤差量測

Y 軸和 Z 軸垂直度誤差量測之硬體架設，如
同量測 XZ 軸垂直度誤差的架設方式一樣，惟擺設
的方向不同。量測時把 Y 軸當成基準軸，因此 Y
軸不動而移動 Z 軸。Z 軸量測的總行程為 50 mm，
因此將量測點設定為 10 個點，移動到量測起始點
後，每次移動 5 mm，並重覆進行 3 次的量測，可
獲得如圖 31 所示的誤差數據。從曲線圖 31 中可
以看出，Y-Z 軸垂直度誤差的最大誤差值出現在移
動到 35 mm 位置時，其具有 6.0 μm 的誤差值。

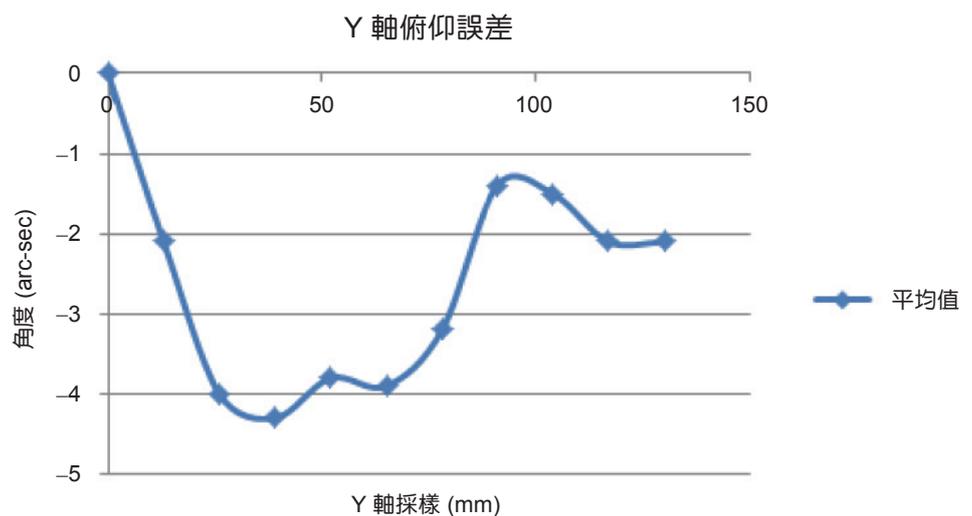


圖 28.
Y 軸俯仰誤差之誤差平均值
曲線。

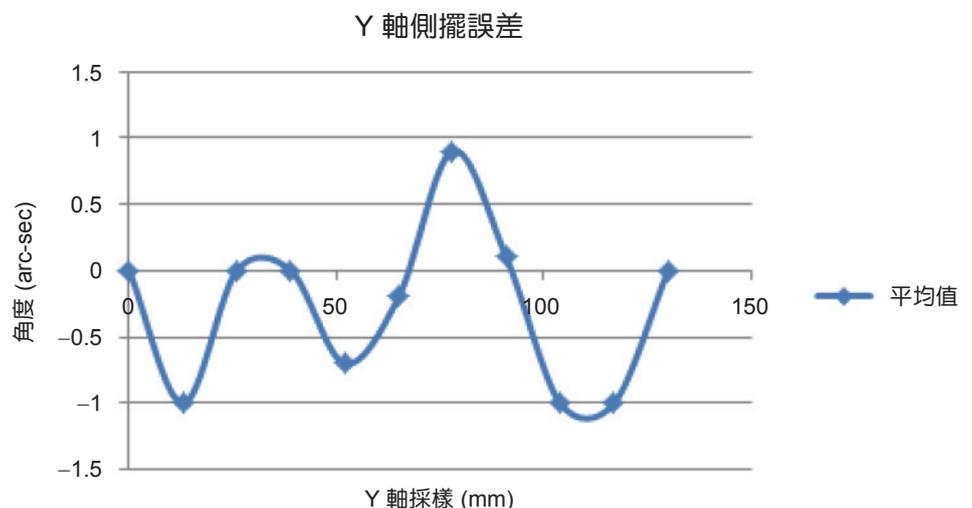


圖 29.
Y 軸側擺誤差之誤差平均值
曲線。

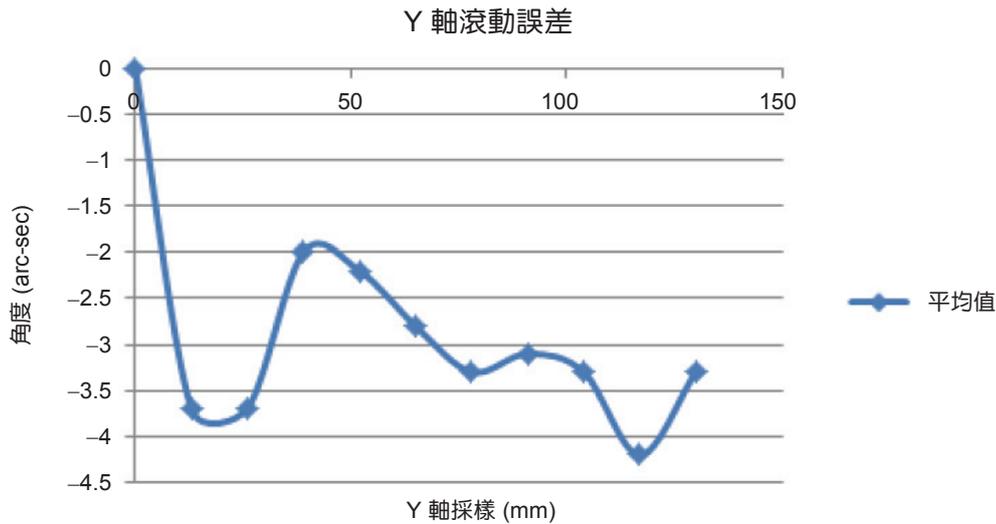


圖 30.
Y 軸滾動誤差之誤差平均值曲線。

4. Z 軸的誤差量測

(1) Z 軸定位誤差量測

Z 軸定位誤差量測之硬體架設，如同量測 X 軸定位誤差的架設方式一樣，惟擺設的方向不同，以及多一個五角稜鏡將雷射光向上反射。由於 Z 軸量測的總行程為 50 mm，因此將量測點設定為 10 個點，移動到量測起始點後，每次移動 5 mm，並重覆進行 3 次的量測，經量測後可獲得如圖 32 所示的 Z 軸定位誤差曲線。由曲線圖 32 中，可知 Z 軸定位誤差的最大誤差值出現在移動到 50 mm 位置時，其具有 5 μm 的誤差值。

(2) Z 軸直線度誤差量測

Z 軸直線度誤差量測之硬體架設，如同量測 X 軸直線度誤差的架設方式一樣，惟擺設的方向不同，同時架設時將多出一個五角稜鏡將雷射光向上反射。量測可獲得如圖 33 和 34 所示的誤差數據曲線。

從曲線圖 33 中可以看出，Z 軸直線度誤差 (偏 X 軸) 的最大誤差值出現在移動到 35 mm 位置時，其具有 9.3 μm 的誤差值；而從曲線圖 34 中可以看出，Z 軸直線度誤差 (偏 Y 軸) 的最大誤差值出現在移動到 45 mm 位置時，其具有 -19.6 μm 的誤差值。

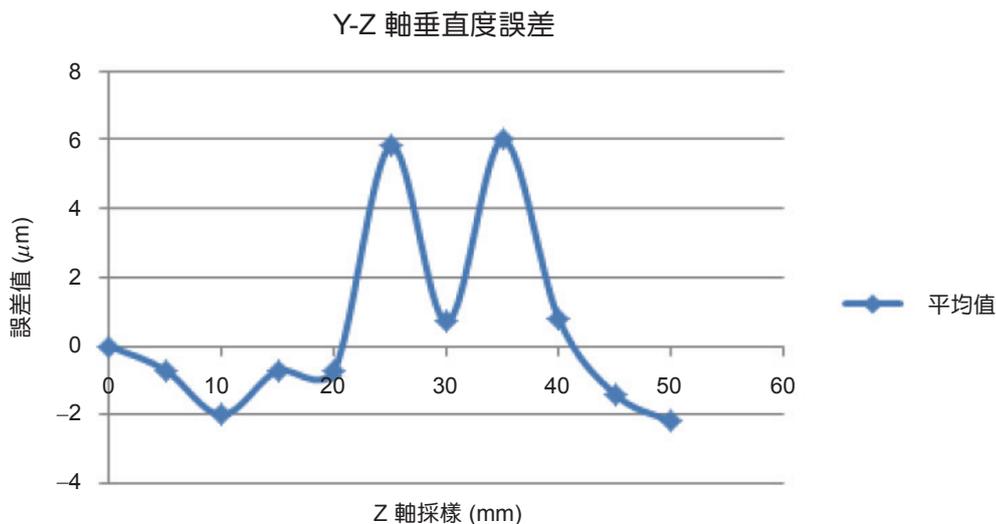


圖 31.
YZ 軸垂直度誤差之誤差平均值曲線。

圖 32.
Z 軸定位誤差之誤差平均值曲線。

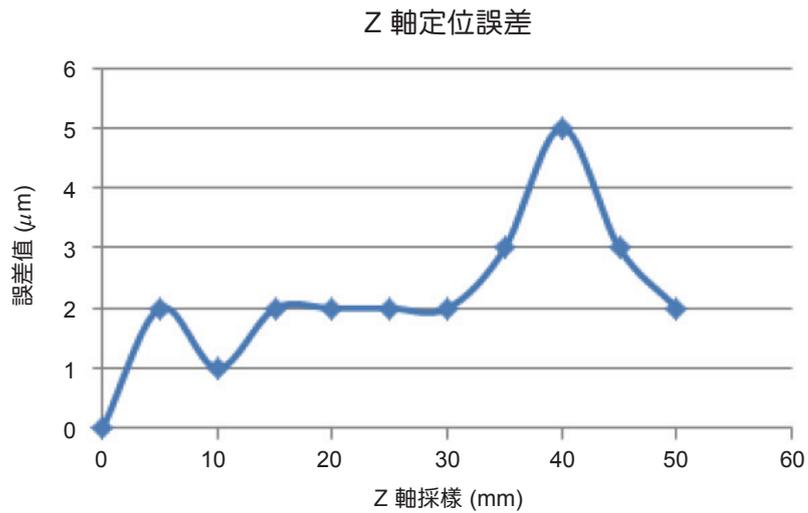


圖 33.
Z 軸直線度誤差 (偏 X 軸) 之誤差平均值曲線。

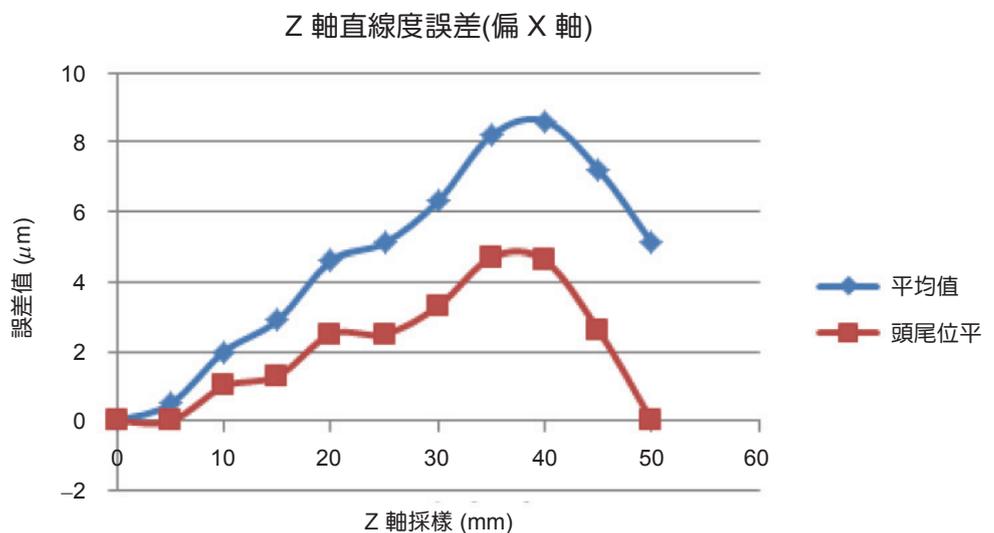
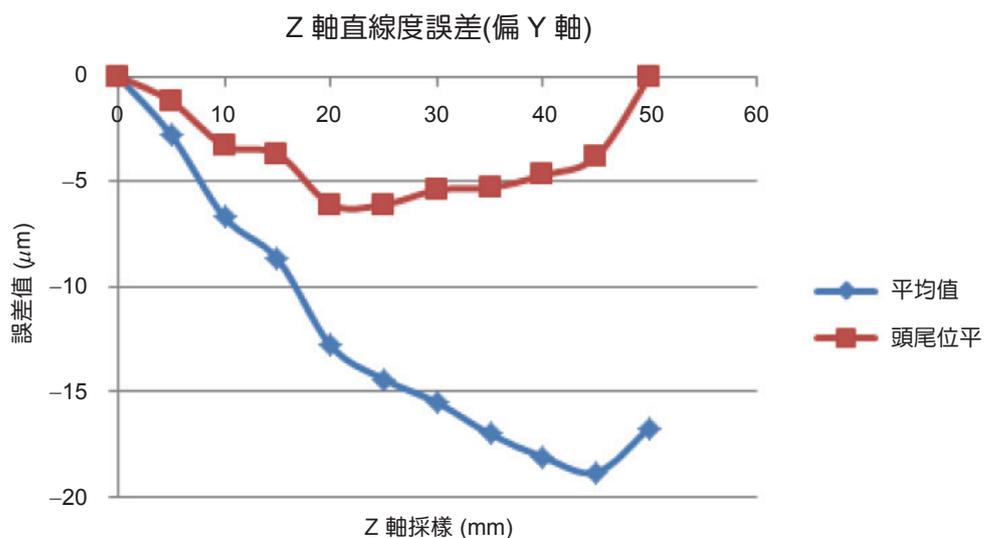


圖 34.
Z 軸直線度誤差 (偏 Y 軸) 之誤差平均值曲線。



(3) Z 軸俯仰誤差量測

Z 軸俯仰誤差量測之硬體架設，如同量測 X 軸俯仰誤差的架設方式一樣，架設擺設的方向不同，同時須多出一個五角稜鏡將雷射光向上反射。量測可得到如圖 35 所示的 Z 軸俯仰誤差曲線。從曲線圖中可以看出，Z 軸俯仰誤差的最大誤差值出現在移動到 30 mm 位置時，其具有 12 arc sec 的誤差值。

(4) Z 軸側擺誤差量測

Z 軸側擺誤差量測之硬體架設，如同量測 X 軸側擺誤差的架設方式一樣，惟擺設的方向不同，同時須多出一個五角稜鏡將雷射光向上反射。量測可獲如圖 36 的誤差數據曲線。

從曲線圖 36 中可以看出，Z 軸側擺誤差的最大誤差值出現在移動到 30 mm 位置時，其具有 -16.9 arc sec 的誤差值。

五、體積誤差量測分析

由各軸向的自由度量測的數據分析看來，所組裝之三軸掃描平台在 X-Y 平台在定位誤差、直線度誤差、角度誤差及垂直度誤差，均具有良好的精準度，惟 Z 軸上下移動模組在設計時，雖然已儘量考慮需減少其位移與偏角誤差的產生，但由於機械加工還是有其極限存在，以及組裝時除了定位的設計外，並沒有使用量測儀器去校正，因此 Z 軸方

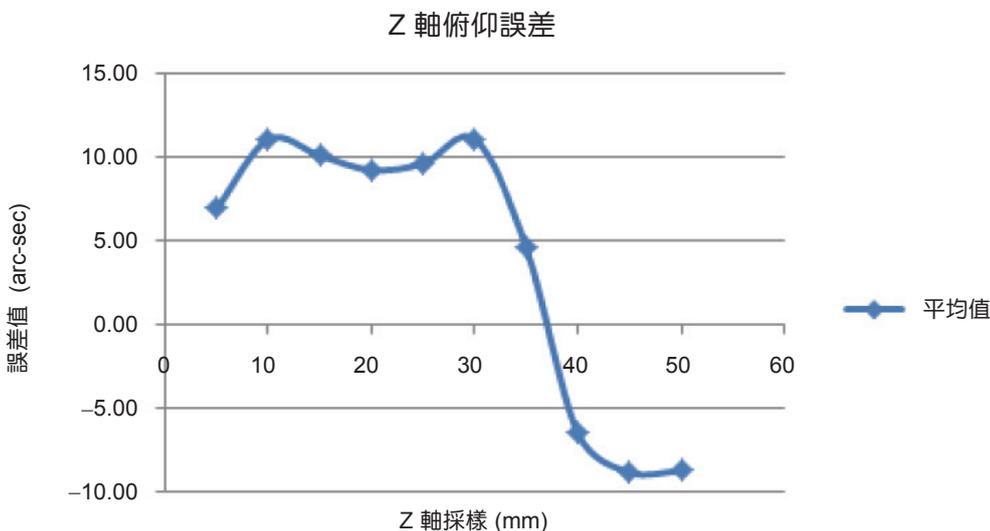


圖 35. Z 軸俯仰誤差之誤差平均值曲線。

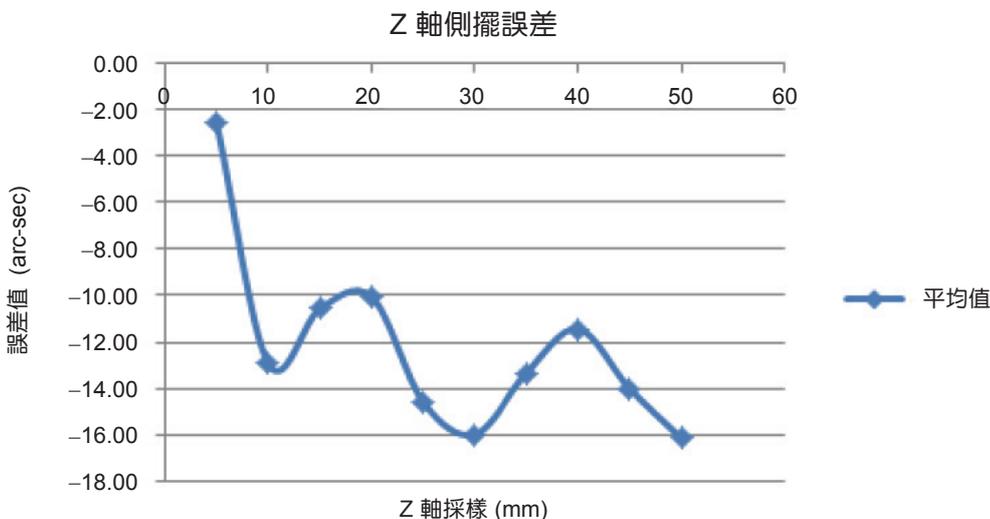


圖 36. Z 軸側擺誤差之誤差平均值曲線。

向的各項誤差值，均有偏大的問題存在。

有鑑於本三軸掃描平台在 Z 軸方向的各项誤差均偏大，因此必須針對 Z 軸模組重新設計校正的裝置，並於進行系統校正組裝，利用硬化直角規、量錶、線性雷射等進行必要的系統校正與組立。經過重新組裝及調整後，針對 Z 軸的各项體積誤差進行重新量測。重新量測完成後發現，經過調整後的 Z 軸模組，各項體積誤差都大幅降低，因此可以了解，校正的機構裝置以及組裝時的校正是相當重要的。

在 Z 軸模組未設計校正機構及未校正前，Z 軸的各项體積誤差都是偏大的，但是經過設計校正機構，並完成校正之後，在其整體掃描範圍內 ($150 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$)，Z 軸之定位誤差由最大的 $30.0 \mu\text{m}$ ，降至 $5.0 \mu\text{m}$ ；Z 軸直線度誤差(偏 X 軸)由最大的 $16.3 \mu\text{m}$ ，降至 $9.3 \mu\text{m}$ ；Z 軸直線度誤差(偏 Y 軸)由最大的 $-50.9 \mu\text{m}$ ，降至 $-19.6 \mu\text{m}$ ；Z 軸俯仰誤差由最大的 $21.9 \mu\text{m}$ ，降至 $12 \mu\text{m}$ ；Z 軸側擺誤差由最大的 $54.6 \mu\text{m}$ ，降至 $-16.9 \mu\text{m}$ 。而 XZ 軸垂直度誤差也從最大的 $14 \mu\text{m}$ ，降至 $-5.3 \mu\text{m}$ 。YZ 軸垂直度誤差也從最大的 $-39.1 \mu\text{m}$ ，降至 $-6.1 \mu\text{m}$ 。經由量測驗證，在一個掃描範圍內 ($275 \times 275 \mu\text{m}^2$)，其體積誤差在三個量測掃描軸向，其量測定位精度均可維持在 $0.1 \mu\text{m}$ 以內，此可驗證本系統在量測微結構之三維形貌能力方面，可以達到次微米等級。

三軸掃描平台之定位精度可以再藉由進一步之量測與最佳化機構校正，可再一次將其誤差有效降低，使其量測掃描系統之精密度可再獲得更佳之等級。

六、工業微元件之三維量測與結果分析

1. 量測方式

本研究中所研發之線上彩色共焦精密顯微形貌掃描量測儀，藉由光機電系統整合，已可達到全自動的量測能力。將被量測物體固定於 X-Y 平台上，調整好光源，量測系統便可進行量測探頭之自動產生校正工作。待校正曲線完成之後，可以於量測軟體內設定量測的範圍，掃描量測儀可依照設定的範圍進行自動量測。假如設定之範圍大於掃描的線長時(線長為 $178 \mu\text{m}$)，系統會自動採取 Z 字型路徑的量測方式，逐步將被量測物體之 3D 形貌建構出來。實驗中將利用掃描量測儀對工業微元件之形貌量測與重建。

2. 量測探頭之重覆性量測與驗證

為了對所研發量測探頭系統進行驗證，本研究使用工研院量測中心國家量測實驗室所監製之標準階高塊，進行量測探頭系統之量測精度驗證，使用之標準階高塊經過特別訂製，以工研院所製作之標準階高塊階高為 $25.3 \mu\text{m}$ ，如圖 37 所示。

由於量測裝置之光軸與標準階高之間可能存在餘弦誤差，探頭所量測之量測平均高度為 $25.78 \mu\text{m}$ ，重覆性量測階高之標準差為 60 nm ，使用反摺積後平均高度為 $25.21 \mu\text{m}$ ，量測階高之重覆性標準差為 12 nm ，重複量測 30 次，其量測結果如圖 38 所示，可得到 $30 \mu\text{m}$ 線型彩色共焦使用反摺積之平均高度為 $25.21 \mu\text{m}$ ，而標準差為 $0.012 \mu\text{m}$ 。

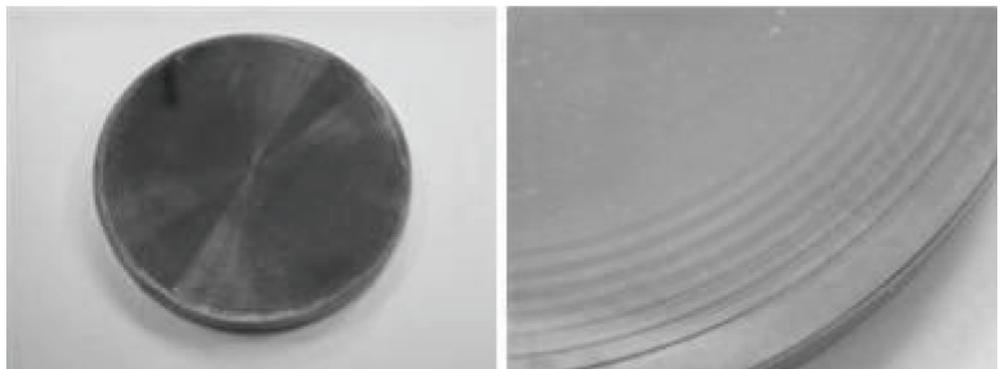


圖 37. 標準階高塊規實體外觀。

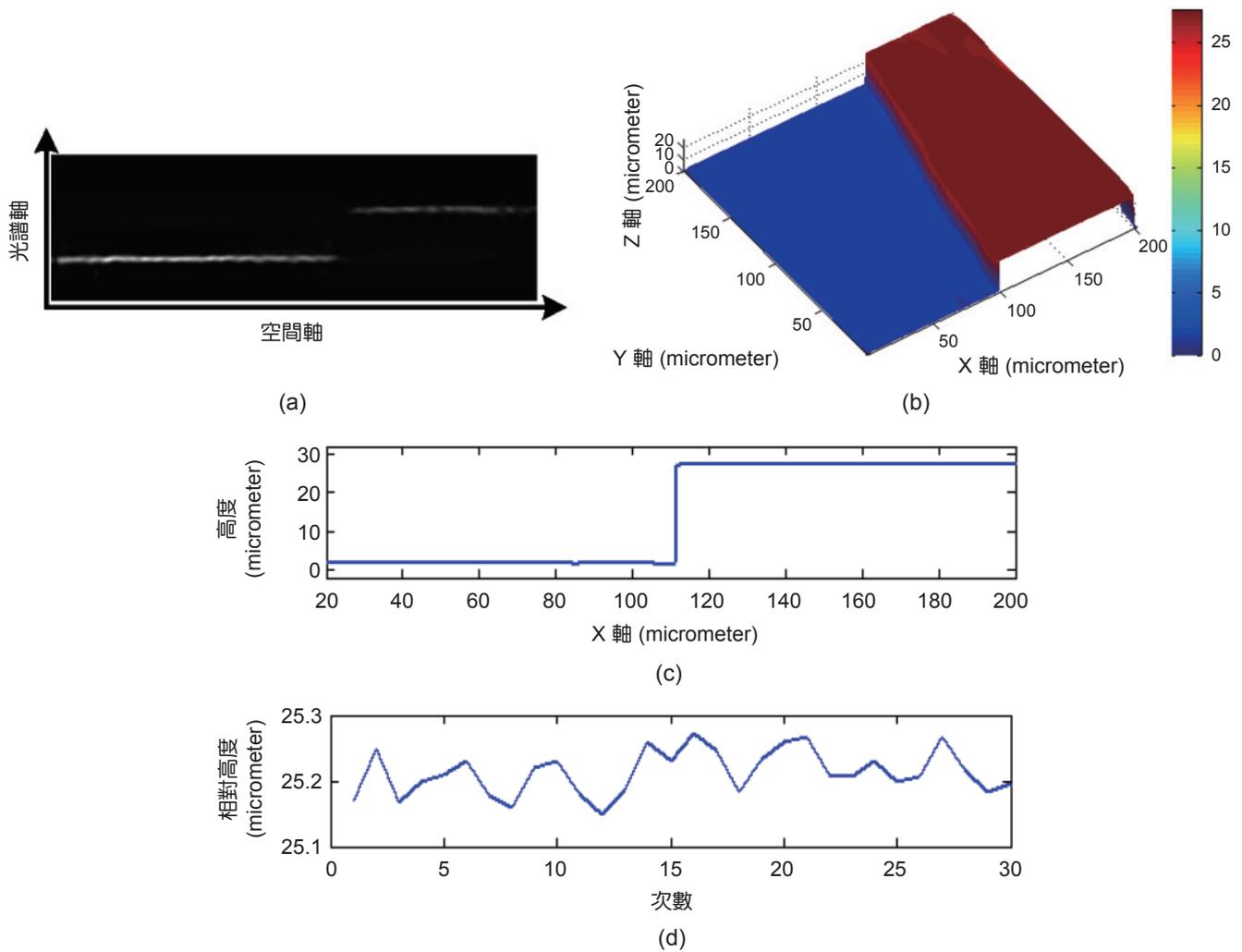


圖 38. 標準階高塊 25.3 μm 量測結果：(a) 光譜影像；(b) 三維形貌重建；(c) 高度剖面圖；(d) 30 次階高重複量測結果。

3. 微凸塊量測

利用線上彩色共焦精密顯微形貌掃描量測儀，進行微凸塊量測，圖 39 為微凸塊之實際影像及光譜影像。

由量測系統量測得到之數據經由反摺積演算後，可消除擴散光源所影響的誤判位置，將微凸塊邊緣接收錯誤反射光強補償，如圖 40 所示，量測評估微凸塊大小為 95 μm ，平均高度為 23 μm 。

4. 透鏡量測

為驗證本量測系統對於透明材質之待測物量測效果，進行量測一光學透鏡，透鏡表面量測可應用於一般之球面透鏡曲率測定，以及較為特殊之非球面透鏡表面形貌三維量測，此實例為平凸透鏡，如

圖 41 所示，由於線型彩色共焦系統對於平滑表面較不易產生雜散光，故量測之效果優良，量測範圍為 350 $\mu\text{m} \times 6500 \mu\text{m}$ ，掃描間距為 10 μm ，如圖 42。

由量測系統量測得到之數據經由反摺積演算後，由於透鏡無法突顯斷高處的橫向交談問題，只會將深度解析逼近單點值，反摺積量測結果如圖 42 所示。

七、結論

本研究整合彩色共焦探頭與三軸精密平台，進行系統發展與體積誤差之量測與校正工作，以發展線上彩色共焦精密顯微形貌掃描量測儀，並對工業

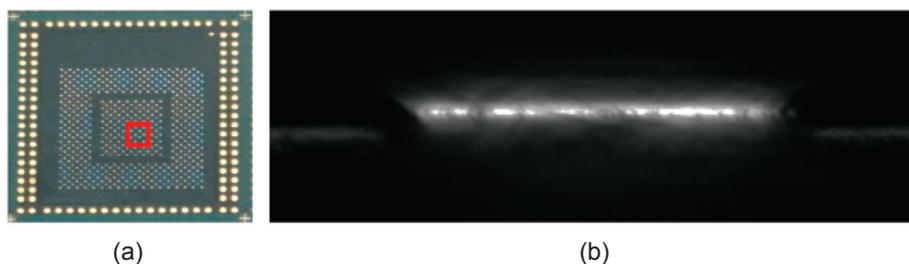


圖 39. 微凸塊：(a) 實際影像；(b) 光譜影像。

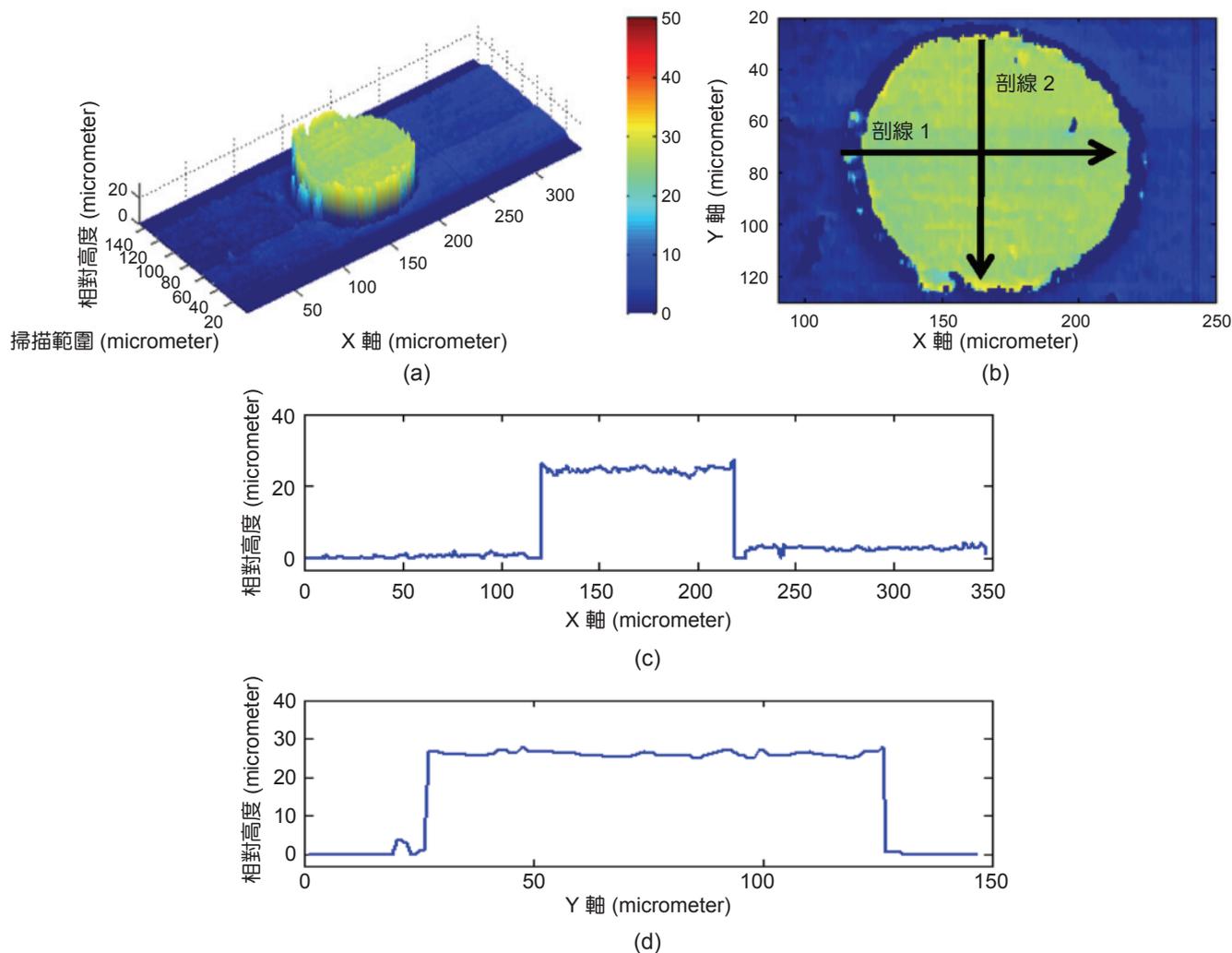


圖 40. 微凸塊三維量測結果：(a) 三維形貌重建；(b) 上視圖；(c) 剖線 1 剖面圖；(d) 剖線 2 剖面圖。

微元件進行全自動之量測與驗證。由量測之驗證結果，整體機台之量測重覆度可以達到微米等級，在一個量測微結構之關鍵尺寸所需的掃描視寬範圍內(目前為設為 $275 \times 275 \mu\text{m}^2$ ，可以再經調整與放大大量測視寬範圍)，其體積誤差沿量測掃描軸向上，

其量測定位精度均可維持在 $0.1 \mu\text{m}$ 以內，此可驗證本系統在量測微結構之三維形貌能力方面，已可達到次微米等級。線上彩色共焦精密顯微形貌掃描量測儀之發展已經更進一步接近工業界之實用階段。

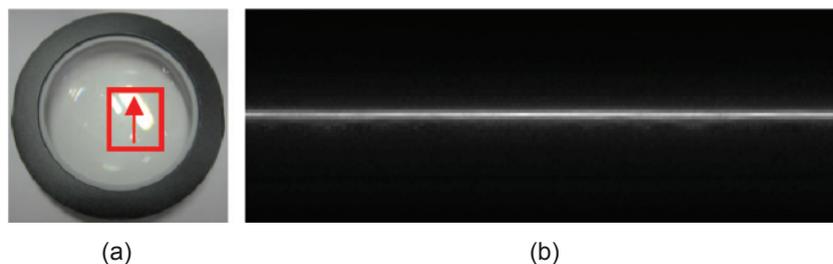


圖 41. 平凸透鏡：(a) 實際影像；(b) 光譜影像。

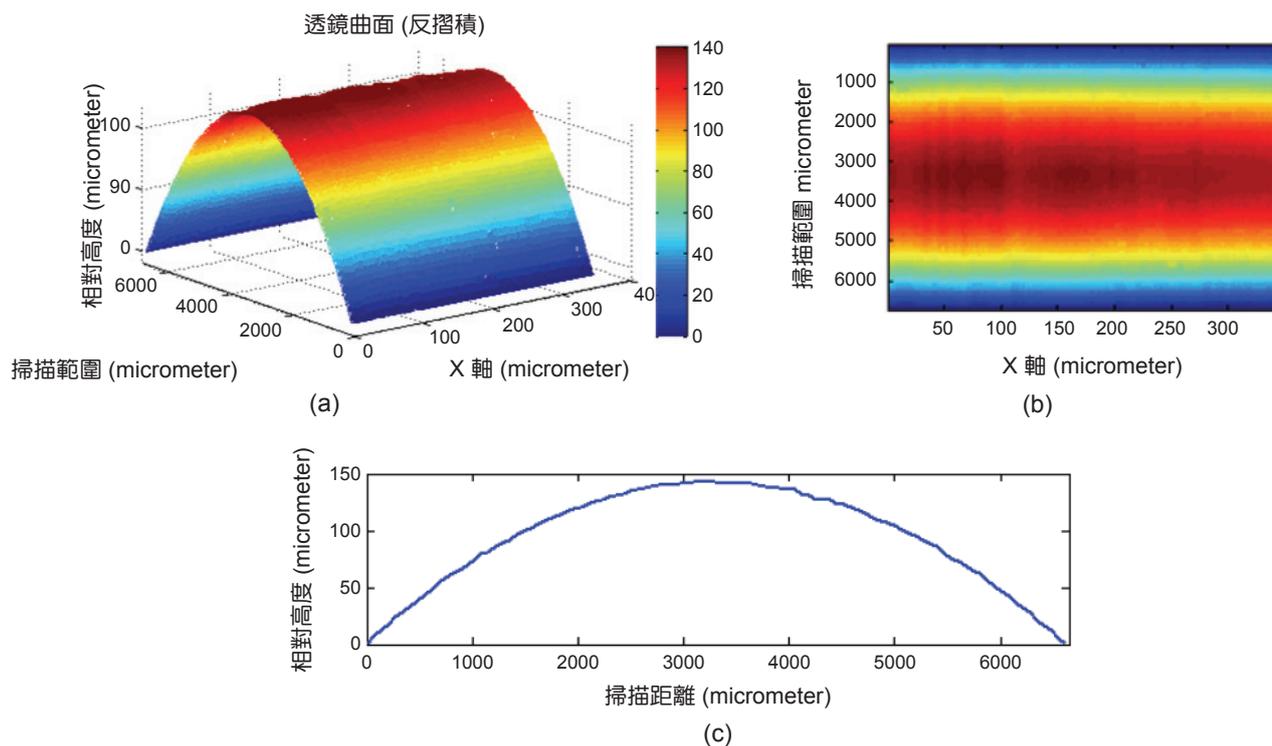


圖 42. 平凸透鏡量測結果：(a) 三維輪廓重建圖；(b) 上視圖；(c) 量測剖面圖。

誌謝

感謝國立台灣大學機械系范光照教授、智泰及光動公司工程師，協助體積誤差量測之技術。

參考文獻

1. E. Dusch, T. Dorval, N. Vincent, and M. Wachsmuth, *Journal of Microscopy*, **228**:132-138, 1365 (2007).
2. R. Wolleschensky, B. Zimmermann and M. Kempe, *J. Biomed.*, 064011 (2006).
3. 林宗毅, 線型彩色共焦量測信號橫向交談問題之研究 (2012).
4. 陳亮嘉等人, 線型多波長共焦顯微鏡模組以及線型多波長共焦顯微方法與系統.
5. 陳亮嘉等人, 線型彩色共焦顯微系統.
6. 陳亮嘉等人, 面型彩色共焦顯微系統及其訊號處理方法.
7. 陳亮嘉等人, 雙狹縫式差動共焦量測裝置與方法.



陳亮嘉先生為澳洲南澳大利亞大學先進製造與機械工程博士，現任國立臺灣大學機械工程學系製造組教授。

Liang-Chia Chen received his Ph.D. in Advanced Manufacturing and Mechanical Engineering of the University of South Australia. He is currently a professor of Department of Mechanical Engineering in National Taiwan University.



林章民先生現為國立台北科技大學自動化科技研究所碩士班學生。

Chang-Min Lin is currently a Master postgraduate student in the Graduate Institute of Automation Technology at National Taipei University of Technology.



林世聰先生為國立台灣大學機械研究所博士，現為國立台北科技大學光電工程系專任教授。

Shyh-Tsong Lin received his Ph.D degree in Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a professor of Electro-Optical Engineering in National Taipei University of Technology.



阮忠德先生現為國立臺灣大學機械工程學系研究所碩士班學生。

Duc-Trung Nguyen is currently a Master postgraduate student in Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University.