

可變焦式透鏡於距離量測系統之應用

Development of Confocal Displacement Sensor System with Varifocal Lens

藍子賢、葉政傑、盧柏榕、鄭璧瑩、翁俊仁

Tzu-Hsien Lan, Zheng-Jie Ye, Bo-Rong Lu, Pi-Ying Cheng, Chun-Jen Weng

本文基於雷射共焦理論探討在距離量測應用上的設計與評估，本研究在距離量測系統中加入可變焦式透鏡，成為一個具有可變焦功能的共焦距離量測系統；利用此可變焦式透鏡快速變焦之特性，取代一般傳統共焦測距法所需的 Z 軸方向垂直移動機制，藉此建立精確快速的距離量測系統，如此不僅能節省系統元件的複雜度及降低成本，還能避免 Z 軸方向運動時造成的各種誤差或干擾。量測系統最前端設計可容易置換不同倍率的物鏡，經實驗證實提高物鏡倍率可以加強整個系統對入射光源的聚焦能力以達到更穩定精準的距離量測效果。本研究也利用不同材質物件的量測結果比較確認此距離量測系統的可行性與實用性在大部分的材料中都可以有一定程度的量測效果，有利於未來的各項應用。

In this research, a special varifocal-lens was equipped into the displacement sensor, which provided the ability of varifocal length in measurement. Using the feature of different driven currents that differs the varifocal length rapidly, it replaces the traditionally confocal measurement that depends on the vertical movement in z-axis. It not only reduces the complexity of components and cost, but also avoids the error caused by z-axis motion.

一、前言

物體三維形貌或表面瑕疵的掃描在工業上是相當常見的作業流程，目的為偵測或分析一個物體的外觀或幾何構造等等，並將掃描偵測到的資料在電腦中描繪或重建出物體的外觀模型以方便在電腦中對此一物體進行分析或應用的模擬，常見的應用有瑕疵檢測、逆向工程、生物資訊或 3D 印表機建模等等，是在工業或研究上不可缺少的技術⁽¹⁾；其中顯微等級的表面量測在工業應用的重要性逐漸提升，又或者是表面形貌之幾何形狀較複雜如微小的

鑽洞或管道的掃描測量，這些都需要較不易造成磨耗或損傷的檢測系統，同時又必須兼顧較小的探頭孔徑，因此在這類特殊要求的表面掃描中常見使用光學原理的感測器。一般常見的三維掃描儀器幾乎都是以接觸式的探針為主，此方法也是現今工業或科技上常用的方法，此種方法目前雖廣泛應用，但由於其工作方式需要採用一極細針頭來回接觸待測物品，這樣的量測形式不僅耗時，且容易對所要檢測的物品表面造成傷害如刮傷等等。為改善一般接觸式探針造成的磨損問題以及探頭孔徑的限制，非接觸式量測的應用便因應而生，此技術即為光學量

測技術⁽²⁾，光學量測技術即用光束或雷射光取代一般探針探頭；基於幾何光學的共聚焦理論，若是欲掃描物品與雷射光源的距離剛好是雷射光束的聚焦距離，則反射回的光束能量最強，如此便能判斷待測物品與光源的距離⁽³⁾。進一步使用影像處理的方法將平面影像分層並建構三維模型，精度、速度皆大幅提高，但成本也相對提高許多⁽⁴⁾；共焦顯微鏡即為其中一種常用的代表⁽⁵⁾，利用光線聚焦的原理將物體分層建構表面形貌，其穩定及能精準建構三維樣貌的特點使得現今工業對此技術愈來愈重視。當一個光源經過透鏡或物鏡後聚焦於焦點上，此時將一個物體放置於焦點位置使得入射光線反射，則由於此光源聚焦於此位置，故從此位置反射回的光線將會沿原聚焦路徑中對稱於透鏡中心的共軛路徑反射回原光源位置，此現象稱之為共軛焦或稱共焦 (confocal)，此時位於其焦距距離的斷層面稱為聚焦面，聚焦點外的樣品層，則稱為非聚焦面，共焦技術利用光聚焦在聚焦面反射而回到原點的光線密度會最高之特性，經常被應用在過濾反射自非聚焦面的雜訊反射光，此技術利用光學針孔光圈縫隙極微小的特性，使得只有反射自聚焦面上的反射光能夠通過，並過濾掉大部分不在聚焦平面上的反射光，如此便能讓位於聚焦面上的影像最為清晰。常見的光學共焦現象之應用如共軛焦顯微鏡等等，即利用空間濾波器來降低雜訊的強度，讓共焦顯微鏡可以取得在樣品表面上特定距離的反射光影像，因此可以得到較佳的影像，即為共軛焦顯微鏡的原理，此技術不僅提高了顯微鏡的解析度，還讓顯微鏡的技術能達到三維而非只有二維，因此是現今各界重視的技術⁽⁶⁻⁹⁾；利用共焦理論進行距離量測的原理與此方法相似，利用雷射光源並搭配光學針孔光圈進行空間濾波消除雜訊，過濾掉非聚焦面上反射回來的光，只有聚焦光能通過，再搭配量測光強度的儀器分析反射光能量的強度，尋找反射能量曲線之峰值位置，藉此就可以判斷位於聚焦平面上的物體距離，即軸向之 Z 軸位置，稱雷射共焦，通常會搭配 XYZ 三軸的移動配合而成為一個非接觸式表面形貌掃描的系統。共焦技術的應用源自於幾何光學對於光的路徑特性研究，現今常用應用於共焦顯微鏡以及共焦測距掃描技術，非接觸式的光探

針技術即為共焦測距掃描的應用。

可變焦式透鏡的開發與應用在近年才被提出並有所發展，會應用於共焦測距掃描技術的理論更是少之又少，首先有文獻提出方法讓已經分為數個不同波長色光的白色光源穿過可變焦式透鏡後藉由透鏡的焦距變化分別讓不同波長的不同色光穿入一個狹縫之中，成功證明可變焦式透鏡在改變焦距應用的可行性，並且不同波長的焦距差異極微，證明可變焦式透鏡的焦距藉由不同輸入電流的變化可達到極高的精度以及極小的變化刻度，也讓人期待可變焦式透鏡應用於線型彩色共焦掃描技術的可行性。本篇文章是基於我們所發表之文獻並外加一些新的實驗數據所整理分析撰寫而成⁽¹⁰⁻¹¹⁾。本研究主要方向為利用常見非接觸式探針與透鏡的結合，研發出更方便快速的物體表面非接觸式掃描方法；研究基於幾何光學共聚焦理論的原理進行雷射測距掃描，加入了可藉由電流改變快速控制焦距改變的可變焦式透鏡以快速改變整個架構的焦距，並希望能夠配合 X-Y stage 的二維移動，在二維座標平面上的每個點紀錄 Z 軸高度，完成三維掃描架構。

二、量測原理與系統架設

本文提出之雷射光束配合可變焦式透鏡之雷射掃描距離量測系統之架構圖如圖 1，此雷射光束驅動器可從多個不同波長的雷射光束中選擇其一波長的光束發出，針對多波長雷射光束驅動器選擇一個適合的雷射光束後，將此波長之光束首先導入一個分光光纖後，此光纖可分別將雷射光導入可變焦式透鏡中並接收反射而得的反射雷射光再導至能量偵測儀中以供偵測反射能量，如此便能完成一個特殊的雷射聚焦距離量測架構。本研究中各個實驗的電腦控制程式皆是用 LabVIEW 控制程式完成，利用電腦程式控制對可變焦式透鏡輸入不同的電流達到快速改變雷射光束聚焦位置的目的；為了加強聚焦程度差異使得聚焦位置更容易分辨並提高此實驗架構的精準度，本實驗系統在可變焦式透鏡前方分別放置不同倍率的物鏡以提高解析度並能夠比較各個不同倍率物鏡的效果，可藉由改變不同倍率物鏡以符合各不同狀況下所要求的精度及解析度；實驗用

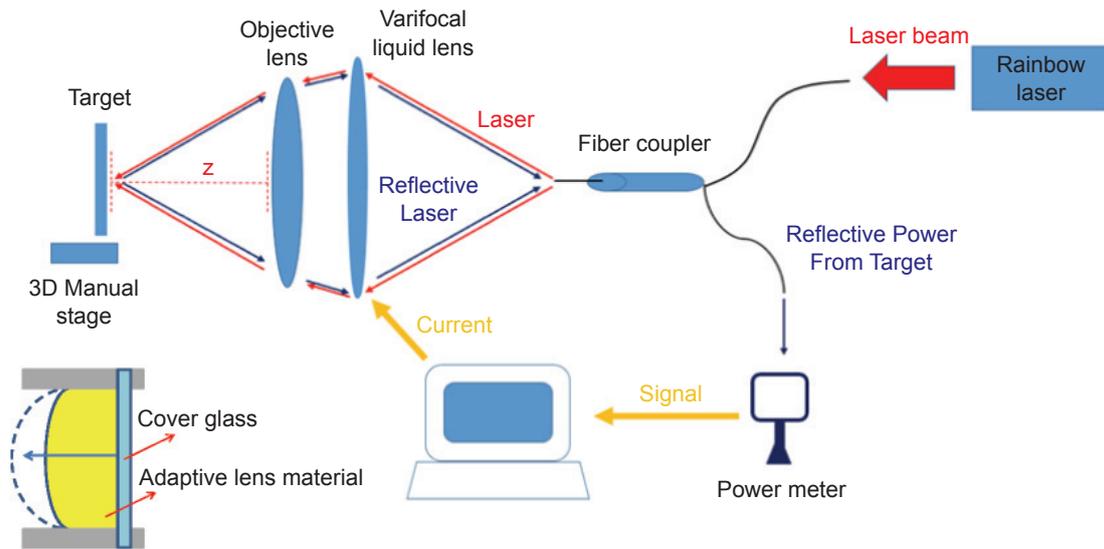


圖 1. 本研究之雷射共焦掃描測距系統架構示意圖。

之掃描樣品則搭載於一個三維移動平台上，完成此雷射掃描測距系統架構。實際量測流程如下：選定波長的雷射光束經由此量測系統投射至欲掃描偵測之量測目標上，再將反射而回的光束經由分光光纖導入能量量測儀中進行偵測，並對可變焦式透鏡不斷輸入不同的輸入電流，量測反射回的光束能量，配合幾何光學共焦理論，定義反射能量相對最大時，量測目標之反射表面所在位置與雷射光束的聚焦位置重疊，即為所求之聚焦位置，進而分析判斷掃描之物品與此雷射掃描測距系統之距離；欲掃描之量測目標則因搭載於三維移動平台上，可於三維移動平台上沿著 X-Y 平面二維的方向移動，搭配 Z 軸起伏的量測達成描繪物體三維的表面形貌掃描的目的；而在測量分析本實驗系統的各项距離量測性質時，則會將量測目標沿著 Z 軸移動，以幫助研究本系統之各項性質。

本研究中所使用的多波長雷射，此多波長雷射光束驅動器可由使用者操作由多個不同波長的雷射光中選用其中一種所需之雷射光束，常用的光束為藍光 (488 nm)、綠光 (514.5 nm)、黃光 (568 nm) 及紅光 (676 nm) 之雷射光束；圖 2 為使用 CCD 攝影機所拍攝出不同雷射光的聚焦點情形，此為多波長雷射光束驅動器能驅動之四個波長光束經由本系統聚焦後在聚焦位置的直徑比較，經測量可得四個雷射光線的直徑都在 $20\ \mu\text{m}$ 以下。

一般常見透鏡之焦距等性質都是固定無法改變，本研究中所使用可變焦式透鏡的特色為可藉由對其輸入不同的電流改變透鏡的曲率進而達到快速變焦的效果；此原理為利用一個容器裝滿特殊光學可變焦，此特殊光學可變焦的光學特性可作為透鏡的材料，且是透鏡能快速變焦的主要原因，另外此容器與光學可變焦間包含一層彈性高分子聚合物薄膜 (elastic polymer membrane)，將可變焦緊緊包覆，藉此讓光學可變焦能夠隨薄膜的變化而改變其形狀與表面曲率，並且因為此可變焦與彈性高分子聚合物薄膜的配合，讓此透鏡的曲率變化程度與彈性高分子聚合物薄膜對可變焦施加的壓力呈現線性相關。可變焦透鏡係利用在與透鏡連接並裝有相同光學可變焦的外圍空間裝載電磁驅動器 (electromagnetic actuator) 與磁鐵，當對此透鏡輸入電流時就能將電流轉為磁力使磁鐵擠壓可變焦至透鏡端，以達到能將使用者對整個元件所施加的電流轉換成薄膜對可變焦施加的壓力進而改變透鏡的曲率及形狀。

圖 3 利用一個 CCD 攝影機拍攝在對此透鏡輸入不同電流時的雷射光線聚焦程度變化，以展現可變焦式透鏡在不同輸入電流下的聚焦效果差異，在未對此可變焦式透鏡輸入電流時 (即輸入電流為 $0\ \text{mA}$)，將此攝影機鏡頭架設於該狀況下的聚焦位置，並拍下各個不同輸入電流時的雷射光，由圖片

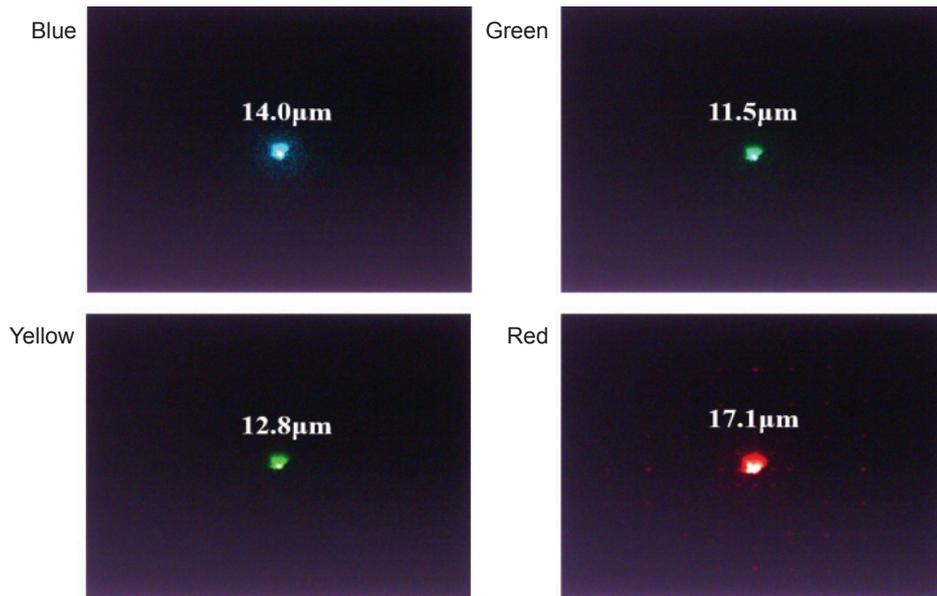


圖 2. 使用 CCD 拍攝之四個雷射波長之聚焦光斑大小。

即可看出改變輸入電流則此系統之雷射光聚焦程度會有明顯的變化，因此，應用於本研究相當適合。

本量測系統中所用之分光光纖主要作用為將接收到的光源一分為二導入不同的目標物中，在系統中 Port 1 連接在可變焦式透鏡前方作為光源發射及接收反射光束的功能，而 Port 2 及 Port 3 則分別連接至雷射光源及能量量測儀，如此雷射光源便能從 Port 2 輸入此光纖並在經由反射後由 Port 1 接收並導入 Port 2 及 Port 3，其中被導入 Port 3 的反射光線將輸入能量量測儀以供量測及分析反射光能量，經由 Port 2 導回雷射光源的反射光束將視為無效之反射光。本研究在整個系統的最前端可變焦式透鏡前方加裝了一個物鏡，以改善整個共焦距離量測系統的聚焦效果，達到更好的解析度及量測精度；由於物鏡倍率不同會有不同放大效果，而針對可變焦式透鏡輸入的電流有固定的範圍限制，故變化範圍也會受限，本研究嘗試使用各種不同倍率的物鏡加裝於系統上，以期望能達到像是顯微鏡能隨意調整放大倍率的效果，配合各種不同的量測需求使用不同物鏡。

1. LabVIEW 程式之儀器自動化控制

本文中的所有實驗都是利用 NI (National Instruments) 公司的 LabVIEW 程式進行撰寫，本實

驗會用到的儀器為能量量測儀的讀值與可變焦式透鏡的輸入電流以及三維移動平台的位移刻度紀錄，能量量測儀使用 NI 公司出產的 GPIB 介面進行連結，可變焦式透鏡則是利用儀器內建的 USB 介面直接連結；利用 LabVIEW 的介面整合，就可達到各儀器的相互配合。

本系統設計之電腦自動化控制程式加入輸入電流作為能控制的參數，利用原廠所提供之 LabVIEW 控制程式進行改寫。因為研究所選用的可變焦式透鏡可承受的電流輸入範圍為 0–293 mA，故程式一開始設計對此透鏡進行 0–293 mA 中固定間隔的逐點掃描 (step scan)；程式運作之流程圖如圖 4，此方法利用步階式規劃逐步改變對透鏡的輸入電流，設計讓使用者可輸入欲輸入的電流最大、最小值以及每次增加的電流間隔，輸入完畢後程式便會依使用者的規劃由最小值至最大值以等間隔逐步輸入電流並同時記錄在每個不同的輸入電流時所接收到的反射光能量，在接收到反射光能量值的同時將此能量數值與前一點電流時的能量數值進行比較記錄較大能量的數值及對應到的輸入電流，不斷比較後找到反射能量的最大值以及對應的輸入電流，找到此反射能量最大值的對應輸入電流後經由分析找出此輸入電流的聚焦位置，定義此聚焦位置即為量測時樣品與實驗架構最前端的距離，

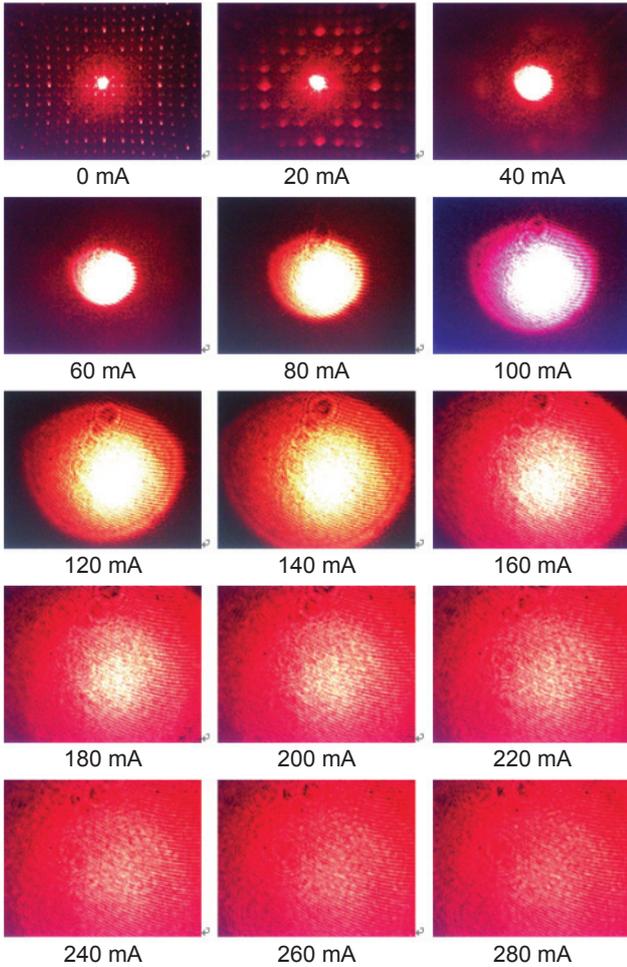


圖 3. 輸入電流變化對可變焦式透鏡聚焦光點大小的影響。

並同時能記錄量測所消耗的時間，在此同時，將能量與電流的關係即時繪製成分布曲線並記錄以供使用者觀察，人機介面設計如圖 5。

本系統的特點之一在於幾乎所有元件都能透過 LabVIEW 電腦控制程式的撰寫進行實驗及配合，讓整個架構能夠因此而完成電腦自動化行程，以增加方便性、提高實驗精準度及讓所有元件達到最有效率的搭配以降低誤差，程式設計方向主要為利用電腦控制可變焦式透鏡的變焦、能量量測儀讀取反射光強度以及量測目標的三維移動（目前由於整個系統處於開發階段，故此部分先以手動式三維移動平台的三維移動取代自動化之移動平台）三項變因進行配合及設計實驗，利用實驗所得之數據進行分析，以及尋找各種不同配合方式中最快速有效率及最精準的方式，讓架構達到最高精準度。

三、實驗結果與討論

1. 施加電流與焦距關係及雷射光源的影響

利用可變焦式透鏡其輸入不同電流就能快速變焦的特性，快速改變雷射光的聚焦位置，配合能量偵測儀偵測能量，尋找反射能量相對最大時所對應到對可變焦式透鏡之輸入電流，進而分析電流與聚焦位置關係，測得該測量物與量測系統的距離；故施加的電流與雷射光束聚焦位置的關係是相當重要的實驗參考依據。因此本研究設計實驗利用控制輸入電流做為控制變因，測試不同輸入電流時的聚焦位置。本實驗在各個不同的固定輸入電流下，利用三維移動平台不斷調整量測目標（此實驗為一個平面鏡）與此量測系統最前端的距離，測量雷射光被平面鏡反射回的光束能量並尋找相對最大值，定義在該最大值下所對應的距離為在該電流下雷射光束的聚焦位置，依此定義在實驗時記錄下每個輸入電流所對應到的聚焦位置，如此便可求出對可變焦式透鏡輸入電流與本研究中的變焦式共焦距離量測系統之聚焦距離的關係。

本研究中的變焦式共焦距離量測系統基於一般共焦系統，以可變焦式透鏡取代一般固定焦距的透鏡，並在此可變焦式透鏡後方加入不同倍率的物鏡以加強本量測系統對入射光線的聚焦能力，使得離焦與聚焦的反射能量差異能更明顯，提升分辨力，因此以下實驗將針對不同倍率的物鏡進行實驗及分析，以分析使用不同的物鏡於本研究架構時的各項特性，並分辨在各種不同量測範圍及精度需求的狀況下，適合應用的物鏡。為了能夠讓本共焦式距離量測系統能完成藉由更換物鏡達到不同用途與不同解析度的量測，必須能夠更直接地比較在架構搭載不同倍率物鏡時的量測效果，將搭載各個物鏡實驗所得的結果進行綜合比較，因此分別將各倍率測得的輸入電流－聚焦距離曲線各取一條進行疊合比較，在本研究選擇各個藍色雷射光作為光源的曲線，並將此 5 個曲線進行疊合，從此結果可以明顯看出使用 5X 物鏡時的量測範圍最大，但線性程度及穩定性較差，且無法與其他倍率曲線相同，達到 290 mA 的電流量測範圍，而除了 5X 物鏡所測得的曲線起伏較大較不穩定外，其餘四條曲線都呈現相當平滑的趨勢，因此為了更加明確地比較及分

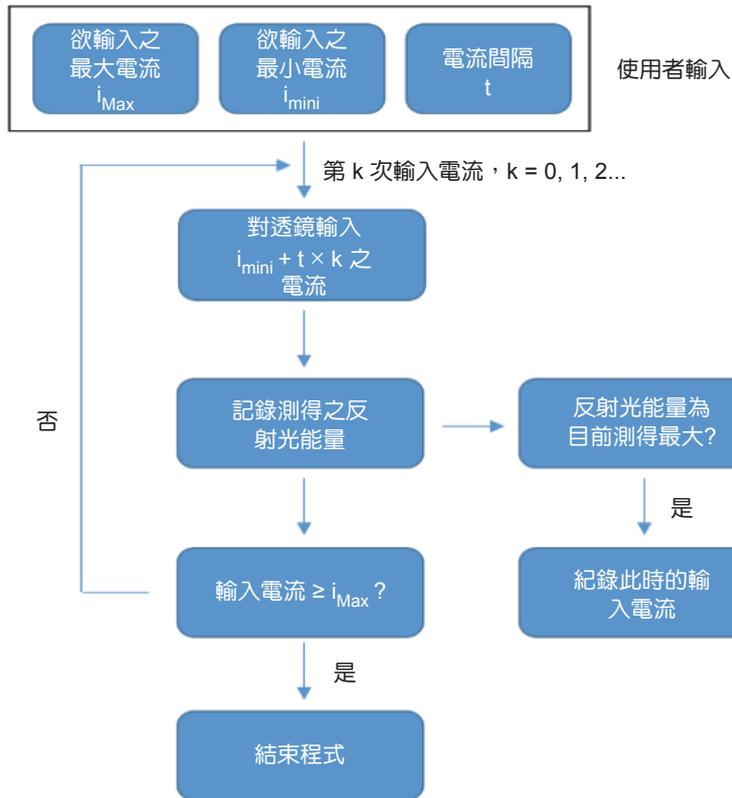


圖 4. Step Scan 測距之流程圖。

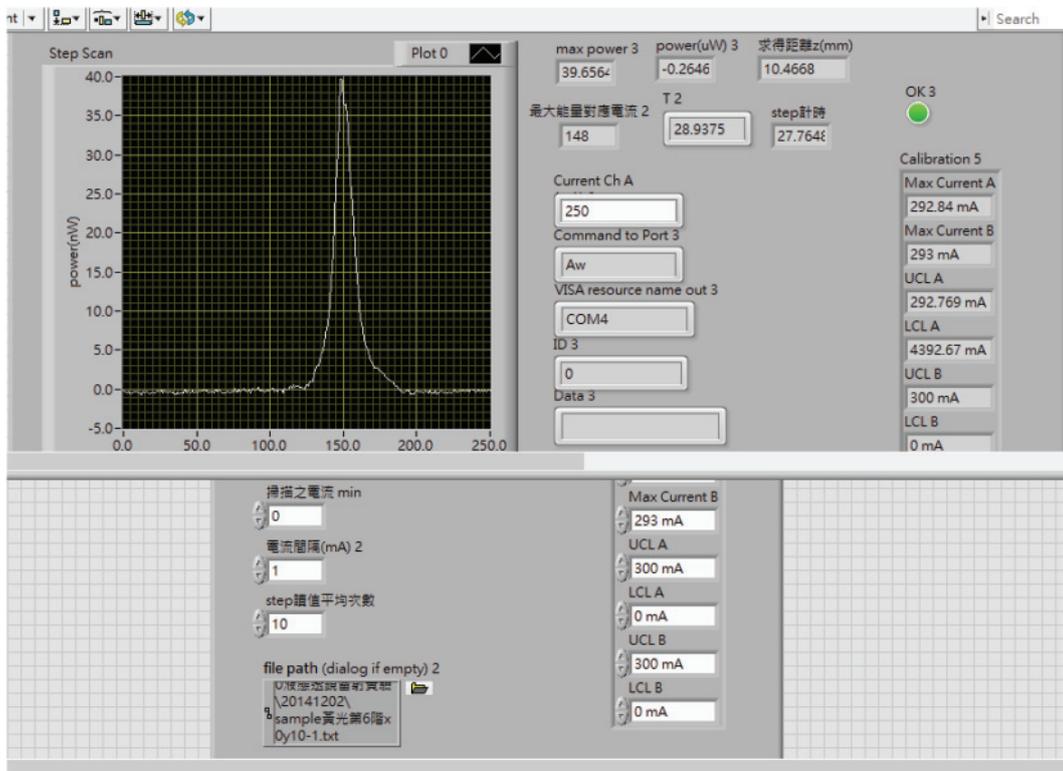


圖 5. LabVIEW 程式人機介面顯示逐點掃描測距結果。

析，由圖 6 可以明顯看出，本變焦式共焦距離量測系統的量測範圍會隨著搭載的物鏡倍率增加而逐漸縮短，但相對地較短的量測範圍能使得本系統在進行變焦量測時精細度更高，甚至搭載 100X 物鏡時可達到奈米等級的量測，藉由此圖即可分辨搭載不同的物鏡適合的量測效果及要求，而除 5X 物鏡曲線外，其他都相當平滑且輸入電流與聚焦距離有明顯的相關趨勢，因此更證明此變焦系統應用於共焦距離量測的可行性。

2. 本系統在量測距離時的重現性

為了確保本研究中的系統在量測距離時的穩定性與每次的量測都能夠順利重現，本研究設計實驗在同樣的量測環境下不停進行重複掃描量測，測試是否能夠穩定重現量測結果，為了避免表面粗糙度造成的誤差，依然使用平面鏡作為量測目標，將平面鏡置於固定距離的位置上，不斷重複進行掃描測距並分析是否每次的測量結果都能相當接近。本實驗探討長時間工作對透鏡溫度及透鏡焦距的影響。可變焦式透鏡成分主要為的光學可變焦，可變焦體積較容易受可變焦本身的溫度影響，體積變化則容易造成透鏡弧度的改變，造成量測誤差，而本變焦透鏡的原廠也提到了此透鏡內的光學可變焦溫度每上升 10 °C 會造成 Focal Power 下降 0.6 dpt 的影響，

表 1. 使用不同倍率物鏡於本研究量測系統時的量測特色比較。

物鏡倍率	量測範圍 (mm)	每 0.5 mA 的距離刻度
5X	22.40 mm	50 μm
10X	4.00 mm	6.50 μm
20X	0.95 mm	1.67 μm
50X	0.14 mm	0.24 μm
100X	低於 30 μm	0.05 μm

本實驗選用的透鏡之 Focal Power 變化總範圍約為 3.5 dpt，故上升 10 °C 會造成約 17% 焦距變化，這樣的變化量對整個實驗結果有相當程度的影響。如圖 7 之實驗數據，對可變焦式透鏡輸入 250 mA 電流持續 15 分鐘記錄透鏡溫度，明顯溫度上升許多。

若是利用本系統長時間的進行距離量測，會造成架構中的可變焦式透鏡溫度提升並影響量測的穩定度，因此本節實驗進行相同量測環境下重複 50 次的距離量測實驗，並記錄每次量測結束時的透鏡溫度，以確認溫度與量測結果的關係。實驗首先在室溫 (約 25 °C) 環境下進行，並且無任何的外力控制工作系統所有元件的溫度，實驗結果如圖 8 所示，總共測量 50 次，溫度上升約 1.25 °C，最大共

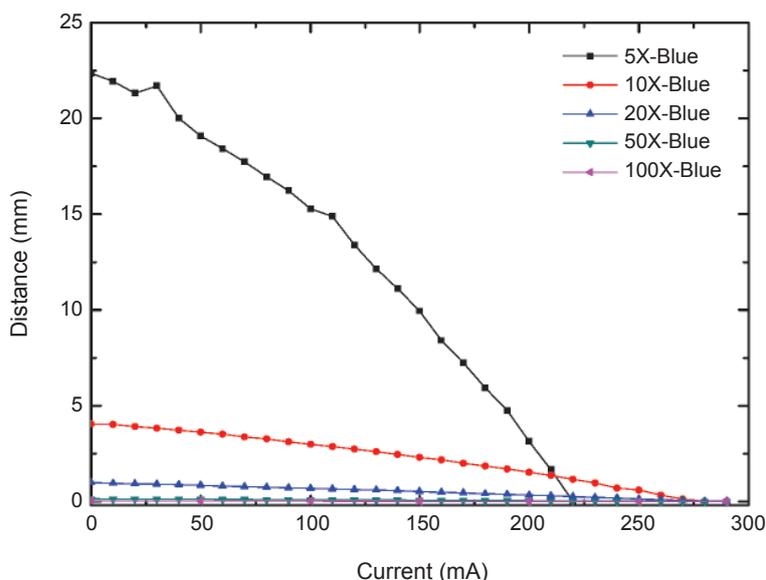


圖 6. 各個倍率物鏡測得的施加電流與聚焦位置關係曲線疊合比較。

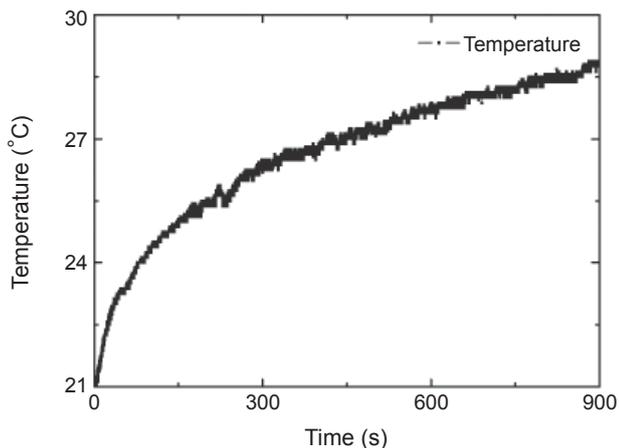


圖 7. 對可變焦式透鏡輸入 250 mA 電流持續 15 分鐘記錄透鏡溫度。

焦信號電流飄移約 $290 \text{ mA} \times 0.08 = 23.2 \text{ mA}$ 。

為了控制本量測系統中可變焦式透鏡的溫度，本研究在系統中的可變焦式透鏡旁放置一個小型散熱風扇幫助散熱 (控制約 25°C)，以抑制不斷重複量測過程中透鏡溫度的上升現象，重複圖 8 之的實驗測試此法是否能夠見效。由此曲線可以明顯看出圖 8 所遇到的現象有明顯改善，量測結果穩定許多，但由於此法並不是完全地控制其溫度，故量測的溫度在較多次的測試後仍小幅度上升約 0.4°C ，

但仍有效地大幅提升穩定性，由圖 9 兩曲線疊合的比較可更加明顯看出較穩定的現象，而實驗結果指出透鏡溫度將是影響量測準確度的一大主因。

3. 使用不同材質作為量測目標時的量測結果差異

本研究希望能將本共焦距離量測系統應用於各種距離的量測或表面形貌起伏的掃描之中，而本研究中的距離量測系統是以共焦原理為基礎分析對可變焦式透鏡輸入不同電流時的不同反射光能量，尋找反射光能量的最大值進行測距，故不同反射率的材質作為量測目標將會對量測結果造成影響，先前的實驗大多以反射率接近 100% 的反射鏡作為樣本，並未測試不同材質的量測效果，因此以下設計實驗針對不同的材質作為量測目標時的量測結果進行比較，分析本研究的系統是否能夠順利應用於各種量測之中。本實驗為了完成比較，選用了鍍銀平面鏡 (Ag-mirror)，即本研究中大部分實驗所選用的平面鏡、鋁板 (Aluminum)、鍍金薄片 (Gold)、鍍鉑矽晶圓片 (Silicon-coating)、矽晶圓片 (Silicon) 以及一般常見的印刷用白紙 (Paper) 進行量測比較，實驗用藍色雷射光作為光源並搭載 20X 物鏡，圖 10(a) 首先利用一個由國家實驗研究

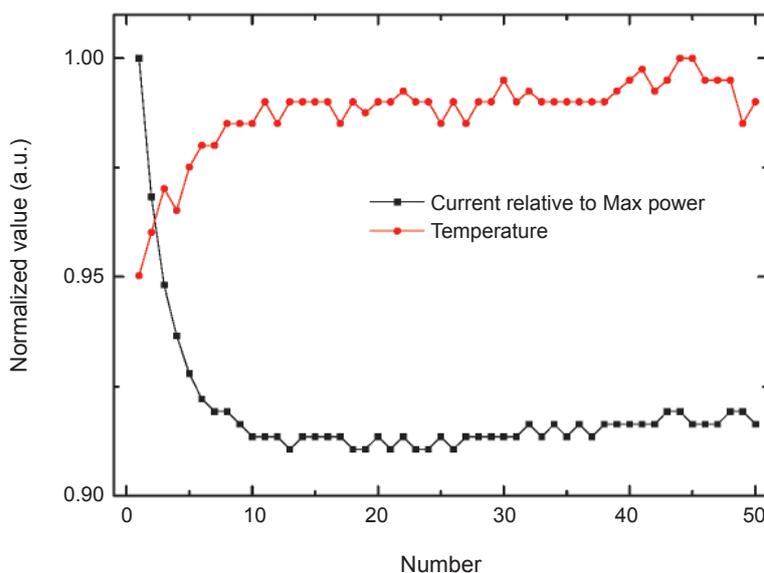


圖 8. 未控制溫度下重複量測 50 次的量測結果，黑線為最大反射光能量對應電流變動，紅線為每次量測時的透鏡溫度。

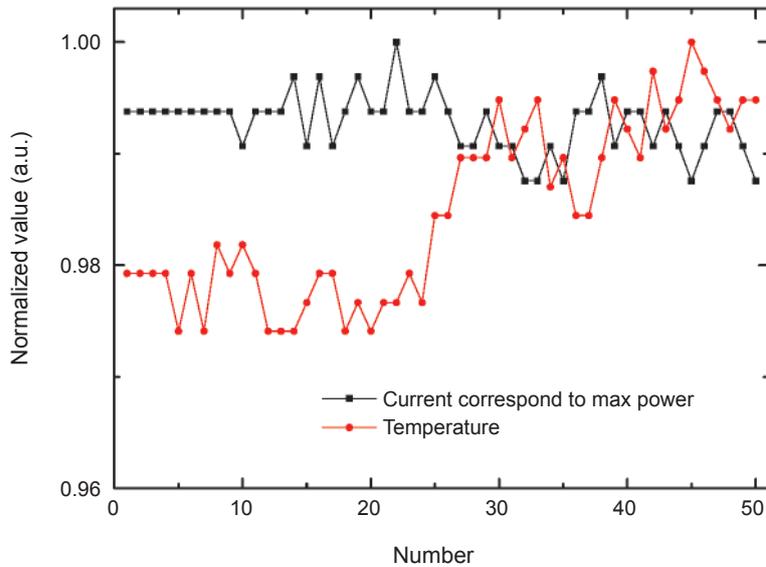


圖 9. 小型散熱風扇控制溫度下重複量測 50 次的量測結果。

院儀器科技研究中心自行開發的寬頻顯微光譜儀量測了這些材質對不同波長光的反射率，以作為本系統進行量測時的結果參考；由於本架構的雷射光源可切換的四個顏色波長分布於 450 nm – 650 nm 之間，故各材質在 450 nm – 650 nm 間的反射率為主要參考值，而在設定的此區間中可以概略將反射率排序為鍍鉑矽晶圓片、鍍銀平面鏡、鍍金薄片、矽晶圓片、鋁板、印刷用白紙，其中鍍鉑矽晶圓片及銀鏡在此區間內的反射率都接近 100%，故期待有相當好的量測成效；而鍍金薄片的反射率在此區間內的反射起伏現象則是由於本身色澤的關係；另外由圖中曲線可看出印刷用白紙的反射率在各波長皆接近於 0%，故可預期量測的效果將會相當差，但若是能證明使用這樣的樣本都能夠量測出期望中的起伏，進而能夠順利分析距離，則可期待本研究之距離量測系統有機會順利應用於各種材質的量測之中。使用這些材質作為量測目標量測而得的實驗結果如圖 10(b)，為了方便比較，橫軸的輸入電流以相對電流表示，將各曲線中最大反射光能量所對應的輸入電流設為 0 mA，並將各個量測得的結果曲線重疊，以進行反射能量及曲線趨勢的比較，而由以下的量測結果可看出，最大的反射能量與曲線的起伏幾乎皆與測得的反射率呈現正相關，反射能量最大且起伏最明顯的是鍍銀平面鏡與鍍鉑矽晶圓片 (Silicon-coating)，而由於本實驗所選用的光源為藍

色的雷射光，波長為 488 nm，在約 500 nm 左右的波長下，鍍金薄片與矽晶圓片反射率相近，故兩個量測結果曲線相近，而只有對鋁板的量測結果比預期中的更佳，且在低於 20% 的反射率狀況下仍能如此佳的量測結果，證明本研究之距離量測系統相當有機會應用於各種不同材質的量測之中。

4. 階高樣品掃描量測測試

本節將量測一個表面為步階式起伏的鋁製樣品如圖 11(a)，其表面為共十階的階梯狀起伏，其中前五階 H_1 至 H_5 之高度皆為 0.08 mm，後五階 H_6 至 H_{10} 之高度則是皆為 0.05 mm，全高度共 0.65 mm，本實驗將此樣品置於移動平台上並讓此樣品沿著 Y 軸移動，使用本研究之變焦式共焦距離量測系統進行圖 11(b) 中 H_0 至 H_{10} 每一階的距離量測，令 H_0 之 $z=0$ ，其餘在各階所測得之距離皆以相對於 H_0 之高度表示，如此便能建構出此樣品之表面起伏樣貌，並與設計值進行比較。

接著實驗利用本系統架構進行掃描，實驗使用 20X 物鏡以及紅色光源進行掃描，程式設計讓此樣品在中間點沿著 Y 軸以每步 0.05 mm 的距離進行 110 步的移動。在每一階各量測一個點並將各階測得的曲線中各個最大反射光能量對應相對距離即可表示形貌的變化，為了方便分析及讓量測更加準確，加裝 20 倍物鏡下的共焦訊號，其共焦電流與距離關

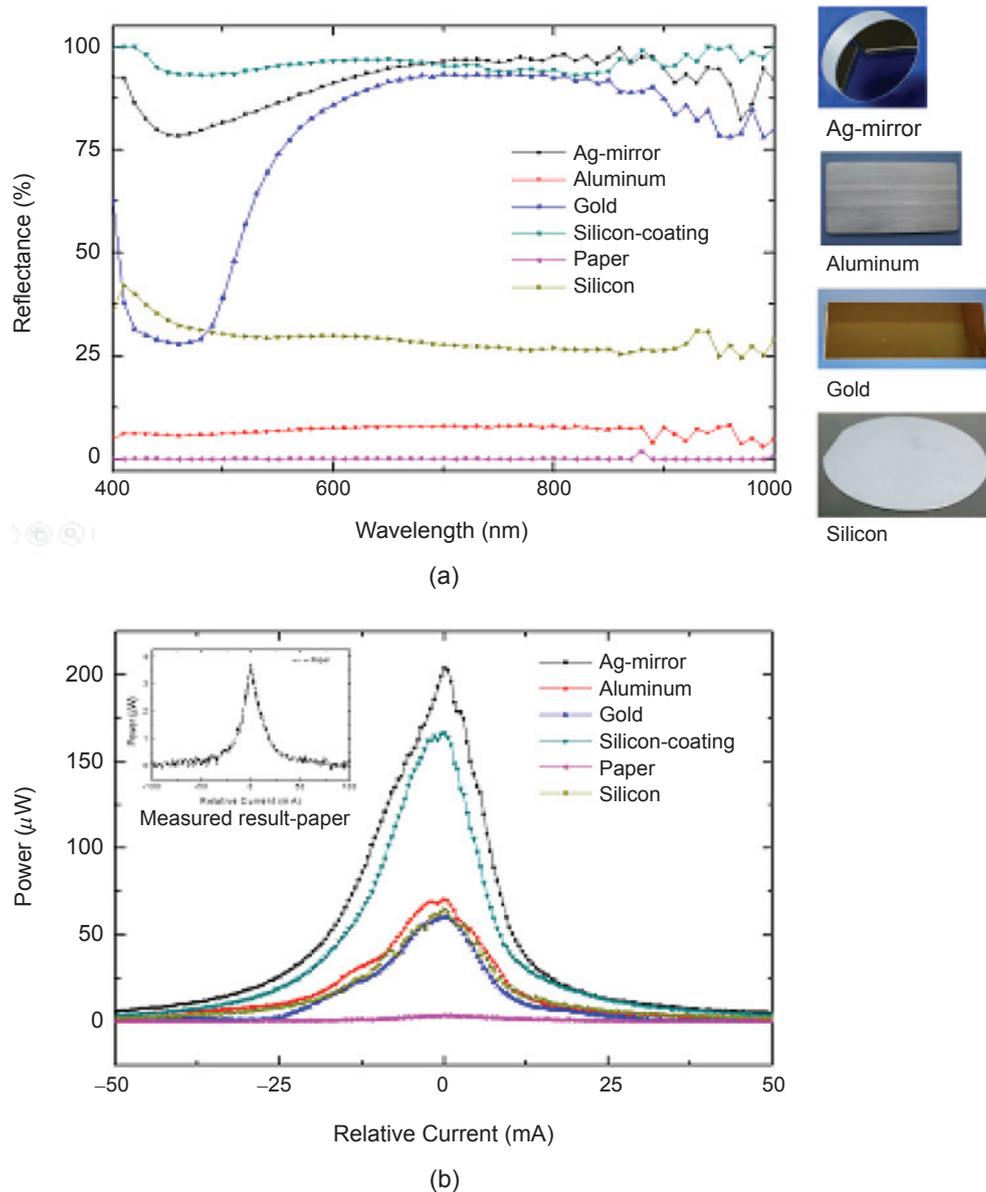


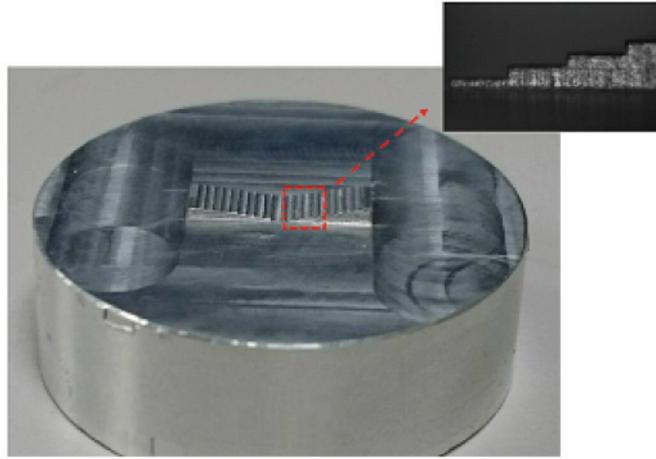
圖 10. 不同材質作為量測目標的比較 (a) 各個材質對不同波長的反射率 (%), (b) 使用本距離量測系統的量測結果。

係式經過我們校正與曲線擬合方法後得到下式：

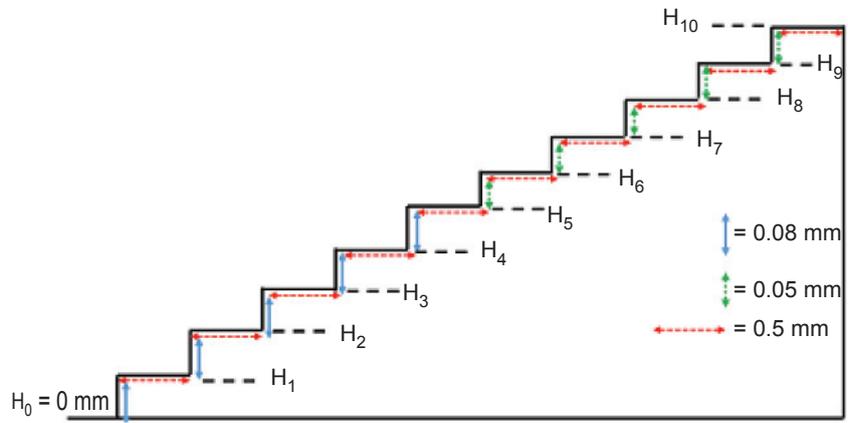
$$z(\text{mm}) = -0.0000029i^2 - 0.0024i + 5.89 \quad (1)$$

接著把掃描結果的共焦電流帶入式子 (1) 中並與設計值疊合進行比較，我們可以得到掃描形貌如圖 12，顯示在未來經過更多更仔細的校正後就能有極佳的掃描效果；另外，其中幾個極為明顯的突

然起伏都可對應到設計值中的各階梯交界處，此現象是由於本距離量測系統是利用光的共焦原理進行量測，因此當碰到有明顯高低差的交界處時容易因光線聚焦於物體尖點而遭反射至其他位置而無法分析，此缺點是進行共焦距離量測時最容易遇到的難題，該如何避免或是利用電腦程式進行分析判別將會是未來讓本研究之變焦式共焦距離量測系統能有更佳應用的關鍵。



(a)



(b)

圖 11. 設計加工之樣品 (a) 實際成品 (b) 設計值。

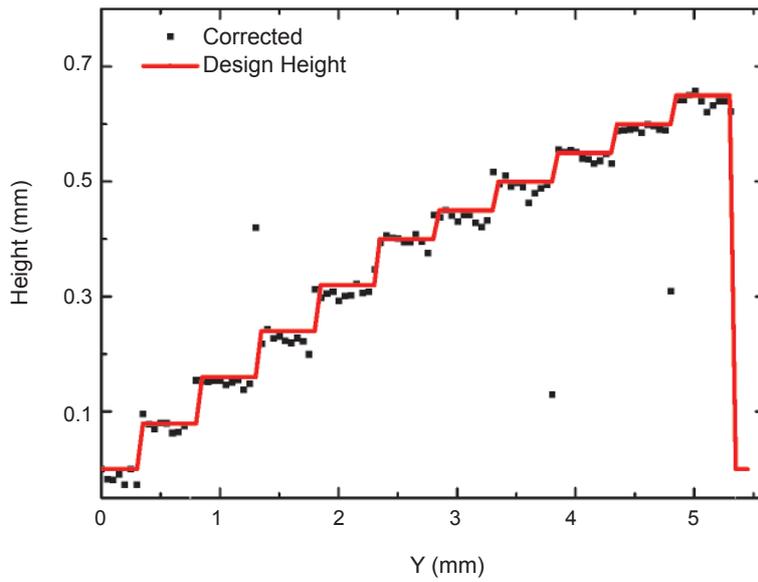


圖 12. 階高樣品之一維形貌掃描與設計值比較。

四、結論

本研究成功地使用一個可變焦式透鏡加入傳統的共焦距離量測系統之中，並搭配 LabVIEW，開發了一個自動化無須 Z 軸方向機械式移動元件的可變焦式光學共焦距離量測系統，各項實驗成果證明利用此法量測距離的便利性及可行性。在不同物鏡的加裝上，本研究系統所得的量測結果可以明顯區別不同倍率物鏡造成的效果，應用 5X、10X、20X、50X 及 100X 物鏡於系統中的量測範圍依序分別約為 22.4 mm、4 mm、0.95 mm、0.14 mm 及 0.03 mm，最後本研究設計一個鋁製表面有不同步階起伏的樣品進行實際掃描應用的仿真測試，測試結果描繪出的表面形貌與設計值起伏誤差最低能到 2% 左右，實驗結果顯示此系統應用於三維表面形貌掃描的可行性。

誌謝

感謝科技部計畫 MOST 105-2221-E-492-019 及 MOST 106-2622-E-492-004 -CC3 之經費補助。

參考文獻

1. Q. Chen, T. Wada, "A light Modulation/Demodulation Method for Real-Time 3D Imaging", *Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, (2005).
2. H. Jordan, M. Wegner, H. Tiziani, *Measurement Science and Technology*, 1142 (1998).
3. K. Lang, D. Hite, R. Simmonds, R. McDermott, D. Pappas, J. Martinis, *Review of Scientific Instruments*, **75**, 2726 (2004).
4. H. Tiziani, M. Wegner, D. Steudle, *SPIE, Opt. Eng.*, **39**, 32 (2000).
5. Y. Zhang, W. Hou, J. Zheng, *Journal of Applied Optics*, **V33** (1), 14 (2012).
6. T. Corle, C. Chou, G. Kino, *Optics Letters*, **11** (12), 770 (1986).
7. E. Shafir, G. Berkovic, *SPIE*, **5952**, 59520X-1 (2005).
8. M. Duocastella, G. Vicidominia, A. Diaspro, *SPIE*, **9330**, 93300Q-1 (2015).
9. A. Ruprecht, C. Pruss, H. Tiziani, W. Osten, P. Lucke, A. Last, J. Mohr, P. Lehmann, *SPIE*, **5856**, 128 (2005).
10. 藍子賢 (民 104), 應用可變焦式透鏡於光學共焦距離量測系統之開發 (未出版之碩士論文), 國立交通大學, 新竹。
11. C. J. Weng et al., "Confocal displacement sensor with varifocal lens", *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 728-733, (2015).



藍子賢先生為國立交通大學機械所碩士，現為台灣積體電路製造股份有限公司工程師。

Tzu-Hsien Lan received his M.S. in mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an engineer in TSMC.



葉政傑先生為國立交通大學機械所碩士，現為中華精測股份有限公司工程師。

Zheng-Jie Ye received his M.S. in mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an engineer in Chunghwa Precision Test Tech. Co., Ltd..



盧柏榕先生目前為國立交通大學機械所碩士研究生。

Bo-Rong Lu is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Chiao Tung University.



鄭璧瑩先生為國立成功大學機械研究所博士，現任國立交通大學機械系副教授。

Pi-Ying Cheng received his Ph.D. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently an associate professor in the Department of mechanical engineering at National Chiao Tung University.



翁俊仁先生為國立交通大學光電工程研究所博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Chun-Jen Weng received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at the Instrument Technology Research Center of National Applied Research Laboratories.