可變焦透鏡多焦點影像應用於顯微形 貌量測

Surface Profiling Measurement and Model Reconstruction of Micro Object Using Varifocal System Based on Multi-Focus Image Fusion

范振亮、林敬烜、鄭璧瑩、翁俊仁 Chen-Liang Fan, Jing-Xuan Lin, Pi-Ying Cheng, Chun-Jen Weng

本文的重點為利用尋焦演算法以及可變焦透鏡,達成多重焦點影像融合的方法以及樣品表面輪廓模型的 建立。大多攝影系統在光線聚焦處皆會有一景深值,若樣品在攝影系統景深內,則所拍攝的影像會是最 清晰的,反之若樣品表面在景深外,則所拍攝的影像會是模糊的。尋焦演算法能夠計算影像的清晰度 (sharpness),演算法的輸出值,會隨著影像變得清晰而增加,因此利用尋焦演算法可判別樣品表面是否在 景深內。本研究利用尋焦演算法可以判別影像清晰度的特性,配合可變焦透鏡達成多重焦點影像融合的功 能,利用多重影像焦距融合演算法就算在景深不足的情況下,也能夠透過融合不同焦距下取得的影像合 成品質良好的影像,並同時繪製出樣品的表面顯微形貌。本篇論文所研究之表面輪廓量測方法為被動式量 測,因此不會直接與待測物進行物理性的接觸,避免掉損壞待測物的風險,適合應用在脆弱的樣品上。

The purpose of this thesis is about to integrate and develop a method of surface profiling measurement that based on the image processing technique into varifocal microscope system. The method of measuring surface profile based on the image processing technique is call shape from focus or multi-focus image fusion. It can measure the surface profile of sample and create an image with large depth of field at same time. If the surface of sample is out of depth of field, the image is blurry. Using focus algorithm can calculate the sharpness of image and help the varifocal microscope systems to determine the best focus setting. The multi-focus image fusion method is established based on focus algorithm and integrated into the varifocal microscope systems in this research. Even in the case of poorly depth of field, our systems are capable to get the all in-focus image with the multi-focus image fusion method and this research can also achieve the functionality of surface profiling in the microscopy scale. The surface profiling method in this research is passive measurement, it does not cause any physically contact to the sample. It can prevent the risk of damaging the sample.

一、前言

本研究著重於調整攝影系統的焦距,尋找出最 佳的焦距,使得攝影系統的景深範圍能夠被調整至 待測物表面位置,以利取得最佳影像。此類尋焦技 術分為主動式以及被動式的尋焦,主動式的尋焦為 利用雷射或是超音波等信號判定待測物位置,接者 再將攝影系統的焦距調整至適當值,而被動式尋焦 的原理為透過影像感測器取得影像後,利用尋焦 演算法計算出影像的清晰度 (sharpness) 並找出最 大的清晰度,以此方式判斷影像是否對焦。本研究 以可變焦透鏡以及聚焦透鏡為基礎的攝影系統,配 合數種不同的尋焦演算法以利取得清晰的待測物影 像。本研究同時利用可變焦攝影系統以及尋焦演算 法進行形貌的量測,形貌的量測也可分為主動式以 及被動式,目前工業上常用的方法為使用接觸式探 **針進行形貌量測**,此方法雖然精度較高,但在量測 的同時會有傷害待測物的風險^(1,2),同時此方法量 測的速度也較慢,本研究所開發之量測方法為被動 式量測,被動式量測為不需要量測儀器發射探測信 號或是對待測物進行物理性的接觸也能夠量測出樣 品輪廓形貌資訊,因此被動式量測可以避免傷害待 測物的風險,相較於主動式量測,這是較大的優 勢,而被動式量測的劣勢為精度可能不如主動式量 涧。

文獻回顧可分為電控尋焦以及尋焦演算法、多 重焦點影像融合、基於影像處理方法之形貌量測。 使用電腦控制液態透鏡或是機械式致動器並配合尋 焦演算法找出最清晰的影像,稱為電控尋焦。尋焦 演算法可計算影像的清晰度,當待測物影像越清 晰,尋焦演算法所計算的輸出值會越大,當待測物 表面正好落在景深內時,待測物影像會最清晰,而 此時演算法的輸出值也會是最大。2004 年 Yu Sun 等人的研究將分析的條件從一般光學顯微鏡中擴大 至相襯顯微鏡 (phase-contrast) 以及微分干涉像差顯 微鏡 (DIC)⁽⁵⁾,該研究分析了139,000 張,包括動物 以及人類器官組織影像,該研究也表明不同的演 算法,在不同的應用下,表現也會不同,比如該 研究表明 Auto-Correlation 演算法在一般的光學顯 微鏡中表現良好⁽⁴⁾,但在相襯顯微鏡以及微分干涉 像差顯微鏡中,表現並不是最佳的,在經過不同 顯微鏡以及條件的分析後,該研究認為 Normalize Variance 演算法才是最佳的。大部分攝影系統的景 深有限,若待測物表面位於景深之外,該部分的影 像將會變得模糊。多重焦點影像融合 (multi-focus image fusion) 又被稱為對焦疊合 (focus stacking), 此技術能夠克服攝影系統景深不足的問題,就算是 在景深狹小的攝影系統,比如顯微鏡,透過此技術 也能夠取得品質良好的影像。此技術的原理為,將 攝影系統在不同焦距設定下所拍攝的影像,利用演 算法判別不同焦距影像的清晰部分,最後將清晰的 部分進行融合,藉此方式延長攝影系統景深,此技 術在一般的攝影或是微米尺度等級的攝影與檢測 有相當高的應用價值。根據 2015 年由 Di Guo 等人 所發表的研究,目前主流多重焦點影像融合技術 大致上可分為兩類,分別是多重尺度分解域 (multi scale decomposition domains) 進行處理或是在空間 域 (spatial domain) 的方法進行處理。多重尺度分 解域的方法為,將不同焦距的影像利用小波轉換或 是拉普拉斯金字塔等方式分解成至不同尺度進行處 理,處理完畢後進行影像重組,然而在 Di Guo 以 及其他學者的文章中表明,利用多重尺度分解域的 方法可能會在影像分解與重組的過程中造成像素位 置的誤判,導致生成出的影像品質惡化,並且通常 此類演算法也較為複雜,運算時間也較長^(6,7)。

在空間域進行多重焦點影像融合的方法也是主 流之一,2006 年 Wei Huang 等人研究所使用的方 法為將影像分為數個小區域⁽⁷⁾,接著使用尋焦演算 法計算不同焦距的影像中清晰的區域並合成為一 張清晰的影像。該文章表明此方法能夠避免多重 尺度分解域影像惡化的問題。在 Wei Huang 等人研 究中,探討了利用不同尋焦演算法所生成的高景 深影像之影像品質,並提出利用均方根誤差 (rootmean-square error)方法計算所生成之高景深影像與 原影像之差異做為評估的標準。利用不同焦距所 拍攝的影像建構出待測物形貌的技術被稱為 shape from focus,由 Sheer K. Nayar 所提出⁽³⁾。該研究使 用機械式平台取得樣品在不同焦距的影像後,接 著用 shape from focus 演算法建構出鏡下的物體形 貌。由於 shape from focus 所需設備簡單,僅需一 單眼相機以及可調整焦距的功能即可達成,且為被 動式量測,因此至今仍有許多學者在探討以及改善 此方法。關於 shape from focus 的研究大多為利用 電動式平台取得不同焦距的影像,本研究則是利 用可變焦透鏡進行不同焦距的影像擷取⁽⁸⁻¹⁰⁾,本系 統耗能更小,系統體積也更簡潔也避免掉了平台 在移動時振動所造成的雜訊,使系統更加穩定。 大多數 shape from focus 方法是以尋焦演算法為基 礎而開發的,因此許多尋焦演算法也會隨著 shape from focus 的研究被提出⁽¹¹⁾,比如 sum of modified laplace 尋焦演算法就是在 Nayar 的研究裡被提出 的。shape from focus 與多重焦點影像融合的邏輯 相當類似,兩者重點皆為找出不同焦距影像中最清 晰的像素,而 shape from focus 更著重於待測物形 貌的建立。

本研究為基於尋焦演算法的多重焦點影像融合 功能開發之形貌量測,首先使用的攝影系統是基於 可變焦透鏡所開發的攝影系統,其特色為能夠透過 可變焦透鏡快速改變焦距並獲得不同焦距的影像。 研究目標其一,為開發電控尋焦功能,並將其整合 進可變焦攝影系統,經由電腦控制的方式調整系統 焦距的同時,並藉由尋焦演算法找出最佳的焦距。 研究目標其二為,克服因待測物表面的垂直落差較 大或攝影系統的景深狹小而容易出現景深不足的 情形,所以本文提出以尋焦演算法為基礎透過高 通濾波器輔助,提出一多重焦點影像融合演算法 (multi-focus image fusion algorithm),將此演算法整 合可變焦攝影系統中,能夠大幅延長攝影系統的景 深,就算是待測物表面垂直落差較大,也能夠從 不同焦距的影像中,生成清晰的影像。研究目標其 三為研究多重焦點影像融合的功能時,發現可以透 過多重焦點影像融合演算法分析出待測物表面的垂 直位置,因此針對以可變焦透鏡為基礎的可變焦攝 影系統進行形貌量測功能的開發,使系統能夠在生 成出多重焦點融合影像時,同時建構出待測物的形 貌。本研究所開發的形貌量測方法為非接觸式的量 測,不會對待測物進行物理接觸,因此能夠避免掉 傷害待測物的風險,適合應用在脆弱、稀有或精密 的樣品上。

二、實驗架設與理論背景

本系統的主要目的為可變焦透鏡之多焦點影像 應用於顯微形貌量測,其為儀科中心所架設之系統 設施,包含可變焦攝影系統,由顯微鏡 BX51M、 液態透鏡 (EL-16-40)、CCD 攝影機 (EO-1312C-HQ LE)、可動式平台以及不同倍率物鏡所組成。主要 目標為能夠在短時間內拍攝鏡下不同焦距的待測物 影像,透過液態可變焦式透鏡能夠快速改變焦距, 可變焦透鏡光焦度 (Focal Power) 的運作範圍為 -3 dpt 至 3 dpt,配合不同的物鏡能夠提供不同的解析 度以及量測範圍。系統架設如圖 1(a)。



圖 1. (a) 儀科中心可變焦量測系統 (b) 液態可變焦透鏡原理 圖片來源: EL-16-40 說明書⁽¹⁵⁾。





本研究的特色為使用液態透鏡,如圖 1(b),取 代傳統的機械式移動平台,其優點為耗能更少、 體積更小同時也不會因為機械式零件的移動產生振動 的雜訊,本研究使用的液態透鏡型號為 (EL-16-40)。 液態透鏡最大的優點就是可以在短時間內快速變 焦,其原理為利用電磁感應產生力,擠壓裝填特殊 光學液體的彈性薄膜,使薄膜產生形變,以此改變 透鏡曲率。可變焦透鏡的特色之一就是能夠快速的 改變光焦度 (focal power),本研究所使用之攝影系 統能夠在數秒內拍攝100張不同焦距的影像,並進 行後續的處理,在本篇論文所使用之可變焦透鏡 (EL 系列),光焦度最小的變化值為 0.0018 dpt,大 約為 0.002 dpt。本實驗所使用 CCD 攝影機,型號 EO-1312C-HQ LE, CCD 為感光耦合元件 (chargecouple device) 的縮寫,它能夠將光的強度轉換成數 位信號,並以影像的形式顯示以及儲存於電子設備, 其影像亮度取決於光源亮度、曝光時間以及增益。 通常 CCD 攝影機在每一個 Pixel 都具有 RGB 三原 色的感光元件,透過三原色的比例分布顯示彩色照 片。在拍攝模式下,可以選擇彩色影像模式或灰階影 像攝影模式。此型號的攝影機的幀數在 1280 × 1024 的解析度下最高為 25,在 640 × 512 的解析度下可 以達到60。相機的幀數決定本系統量測的速度,若相 機的曝光時間加快,量測速度可以得到顯著的提升。

如前言所提及,當待測物表面在景深內 時,所獲取的影像是最清晰的,不同倍率的物 鏡對應到的景深也不同,影響景深的參數有放 大倍率 (magnification) 以及數值光圈 (numerical Aperture),參考景深計算公式⁽¹²⁾以及 BX51M 的 產品說明書(15)可以計算出不同倍率所對應到的景 深,表1為不同倍率透鏡安裝至 BX51M 所對應 到的參數。文中主要以 10 倍物鏡為實驗量測物 鏡。本節將介紹本篇論文中,較為重要的實驗程式 設計以及量測流程的規劃。所使用之程式語言為 LabVIEW。在拍攝完影像後,本篇論文利用了佇 列 (queue) 的程式設計技巧,此量測系統實驗的程 式設計,主要的目的為操控硬體系統,使得此系統 能夠在短時間內取得待測物在各個焦距的影像。當 放置待測物並確定待測物在量測範圍內後,將液態 透鏡的 focal power 設定至最低點,待相機拍攝完 成,增加液態透鏡的 focal power,重複此步驟來獲 得各個焦距的影像。在拍攝完影像後,本篇論文利 用了佇列 (queue) 的程式設計技巧,在拍攝完影像 後立即使用佇列傳送至尋焦演算法或是多重焦點影 像融合或其他擴充功能,使得計算與控制儀器得以 同時進行,使量測速度加快。流程如圖3。

表 1. 不同倍率物鏡對應到的特性資料。

	放大倍率	數值光圈	景深 (µm)	景深 (dpt)
5 倍物鏡	50倍	0.15	59 (µm)	0.045
10 倍物鏡	100 倍	0.25	18 (µm)	0.055



圖 3. 量測程式流程。

1. 尋焦演算法

以下介紹本研究所使用的十二種尋焦演算法及 多重焦點影像融合演算法。

 絕對值梯度演算法⁽⁵⁾:若影像越清晰其像素之間 的差值將會越大,也就是說每一像素的梯度絕對 值也會跟著提升,絕對值梯度演算法計算每一像 素灰階值與鄰近像素灰階值差值後,取絕對值並 加總,以此表示影像的清晰度。

$$F_{abs_grad} = \sum_{Height Width} \sum_{Width} \left| I(x+1, y) - I(x, y) \right|$$
(1)

其中 x 為影像像素在水平方向位置, y 為影像像 素在垂直方向位置, *i*(*x*, *y*) 為灰階影像像素在位置 (*x*, *y*) 之灰階值。

 平方梯度演算法⁽⁵⁾:與第一種演算法類似,唯一 的差別為此方法是計算梯度的平方並加總。

$$F_{sq_grad} = \sum_{Height Width} \sum_{Width} \left(I(x+1,y) - I(x,y) \right)^2$$
(2)

 Brenner 演算法⁽¹⁶⁾:與前面兩者不同的為,此演算法計算每一像素與水平方向第二鄰近像素灰階 值的差值。

$$F_{Brenner} = \sum_{Height Width} \left(I(x+2, y) - I(x, y) \right)^2$$
(3)

 Tenenbaum 梯度演算法⁽¹⁶⁾:此演算法為分別對灰 階影像使用水平方向以及垂直方向的索貝爾遮罩 (Sobel mask)進行迴旋積,再將水平遮罩與垂直 遮罩的輸出值平方後加總。

$$F_{Tenen} = \sum_{Height} I(x, y) \times S_x^2 + I(x, y) \times S_y^2$$
(4)

其中 $S_x(x, y)$ 以及 $S_y(x, y)$ 為水平方向與垂直方向 的索貝爾遮罩對影像做迴旋積後的在位置 (x, y) 的 輸出值。索貝爾遮罩通常用於偵測水平與垂直邊 緣, S_x 對水平邊緣有較大的響應,而 S_y 則是對垂 直方向。以下為這兩種遮罩的形式

	-1	0	1		-1	-2	-1]
$S_x =$	-2	0	2	$S_y =$	0	0	0
	-1	0	1		1	2	1

5. Sum of modified laplace 演算法⁽³⁾:將水平以及垂直的拉普拉斯遮罩對影像做迴旋積後,將水平與垂直方向輸出值做絕對值並加總。

$$F_{SML} = \sum_{Height} \sum_{Width} \left| I(x, y) \times L_x \right| + \left| I(x, y) \times L_y \right|$$
(5)

而 L_x 與 L_y 為

$$L_x = \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \qquad L_y = \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \\ -1 \end{bmatrix}$$

6. Energy laplace 演算法⁽¹⁶⁾:將下方能量拉普拉斯 遮罩對影像做迴旋積後將輸出值平方並加總。

$$F_{EL} = \sum_{Height} \sum_{Width} \left[I(x, y) \times L_{energy} \right]^2$$
(6)

其中 Lenergy 為能量拉普拉斯遮罩

$$L_{energy} = \begin{bmatrix} -1 & -4 & -1 \\ -4 & 20 & -4 \\ -1 & -4 & -1 \end{bmatrix}$$

7. Modified DCT 演算法⁽¹³⁾: DCT 為離散餘弦變 換 (Discrete cosine transform) 的縮寫, Modified DCT 計算方法為,利用遮罩 M 對影像做迴旋積 計算

$$F_{M_DCT} = \sum_{Height \ Width} \sum_{I \times M} I \times M \tag{7}$$

遮罩 M 為

Diagonal laplacian 演算法⁽¹¹⁾:與 F_{SML} 類似,但
 同時也計算對角方向拉普拉斯遮罩的輸出

$$F_{DL} = \sum_{Height Width} \sum_{Width} |I(x, y) \times L_x| + |I(x, y) \times L_y| + |I(x, y) \times L_{d1}| + |I(x, y) \times L_{d2}|$$
(8)

其中 L_{d1} 與 L_{d2} 為

$$L_{d1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad L_{d2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

9. 變異量數演算法 (Variance algorithm)⁽¹⁶⁾:在統計 學中,變異量數為描述其該變量的離散程度,也 就是各變量與其平均值之相差並加總。

$$F_{variance} = \frac{1}{H \cdot W} \sum_{Height} \sum_{Width} \left(i(x+1, y) - \mu \right)^2$$
(9)

其中 H 和 W 為影像長寬, µ 為影像平均值。

10. 標準化變異量數演算法 (Normalized variance algorithm)⁽¹⁶⁾:

在變異量數演算法中除上影像強度平均值。

$$F_{nor_var} = \frac{1}{H \cdot W \cdot \mu} \sum_{Height} \sum_{Width} \left(i(x+1, y) - \mu \right)^2 \quad (10)$$

其中 H 和 W 為影像長寬, μ 為影像平均值。 11. Auto correlation 演算法⁽¹⁶⁾:

$$F_{auto_corr} = \sum_{Height Width} \sum_{Width} i(x+1, y) \cdot i(x, y) - \sum_{Height Width} \sum_{i(x+2, y) \cdot i(x, y)} (11)$$

12. Tenengrad variance 演算法⁽¹⁴⁾:

$$F_{T_variance} = (T(x, y) - \mu_T)$$
(12)

其中 μ_T 為T(x, y)的平均值

$$T(x, y) = \sqrt{I(x, y) \times S_x^2 + I(x, y) \times S_y^2}$$

2. 多重焦點影像融合演算法

本研究建構三維形貌的核心技術為多重焦點影 像融合 (multi-focus image fusion)。一般攝影系統在 聚焦某一樣品表面時,位於景深中之樣品表面影像 中會是清晰的,但景深外的樣品表面則會是離焦的 狀態,在影像中會是模糊的。多重焦點影像融合技 術能夠將不同焦距的影像融合產生一張整張高景深 影像 (image with large depth of field)。若待測物影 像在相機中為清晰時,代表此時的焦距與鏡頭與待 測物之間的距離相等。根據此原理透過分析待測物 在不同焦距下的影像,並判斷每一像素的清晰度以 及其對應到的焦距,則可以依據最大清晰度所對應 到的焦距建構出待測物整體的三維形貌。同時,將 待測物最清晰的像素取出重組為一高景深影像。

本研究發展基於尋焦演算法的多重焦點影像融 合技術,與先前的研究不同的是,此方法加入高通



圖 4. 為本文提出之多重焦點影像融合的方法圖。

濾波器以凸顯高頻區域,使得此方法能夠更精確 的判斷對焦位置。像素只是灰階影像中某一位置 的強度,一般來說,單一像素無法計算出清晰度 (sharpness),因此我們定義該點像素的清晰度為, 利用目標像素周圍的鄰近像素灰階值所計算出的清 晰度,而判定出最清晰像素所對應到之光焦度或距 離資訊,將會被用於合成高景深影像以及樣品表面 輪廓形貌的建構。多重焦點影像融合的影像為透過 不同焦距或改變透鏡 focal power 所取得的影像, 因此可將影像分為數層,本研究透過設定液態透鏡 的 focal power 值改變系統焦距,因此每層影像皆 對應到一 focal power 值。本論文融合多重焦點影 像的步驟為使用高通濾波器至影像源,利用所建構 之光學量測系統取得液態可變焦透鏡在不同 focal power 下的影像後,使用快速傅立葉轉換,將影像 轉換至頻域,並進行高通濾波處理。計算每一像素 的清晰度後使用尋焦演算法計算鄰近像素清晰度, 並以此做為目標像素清晰度。以 Fabs grad 為例,計 算目標像素清清晰度方法為

$$S_n(i,j) = \sum_{x=i-c}^{i+c} \sum_{y=j-c}^{i+c} \left| I_n(x+1,y) - I_n(x,y) \right|$$
(13)

其中 n 為影像的層數,I 為影像源並經過高通濾波 處理, $S_n(i, j)$ 為第 n 層影像,位置 (i, j) 之像素清 晰度,c 為鄰近像素大小。比較同一位置,但不同 focal power 像素的清晰度,並找出最清晰像素以及 其對應之 Focal Power。應用至整張影像,即可得 到 focal power index D(x, y)。

$$D(x,y) = \begin{cases} d_{n,i} \text{ if } S_n(i,j) > S_{n+1}(i,j) \\ d_{n+1}, \text{ else} \end{cases}$$
(14)

其中 D 為 Focal Power Index $, d_n$ 為第 n 層影像所 對應到之 Focal Power \circ

為了建構高景深影像以及三維形貌,將影像源 設定為在不同 focal power 下的待測物影像,因此 將影像源設為三維陣列 $V = (x, y, d_n)$,接著依 focal power index 確定位置 (x, y)所對應到清晰度最大的 像素並生成高景深影像,高景深影像 F 可表示為 F(x, y, D(x, y))。影響高景深影像生成結果的參數 為鄰近像素大小 c,以及高通濾波器半徑 r。圖 4 為本篇論文提出之多重焦距影像融合的方法圖。

多重焦距影像融合演算法所生成高景深影像的 評估方法能夠評斷出何種方法以及參數下,所生成 的高景深影像是最佳的。本研究所使用的評估方法 為均方根誤差 (root-mean-square error) 簡稱 RMSE

$$RMSE = \sqrt{\sum_{x}^{W} \sum_{y}^{H} \frac{\left[I(x, y) - I_r(x, y)\right]}{W \times H}}$$
(15)

(x, y) 為影像像素位置, W 以及 H 為影像的寬跟 高, I(x, y) 為高景深影像, I_r(x, y) 為參考影像, 參 考影像的建立方式為利用人工分割的方式將影像分 割,再將各區域最清晰的影像拼接,在下節會做詳 細介紹。RMSE 方法是相關研究常用的評斷方法之 一⁽⁷⁾,它能夠代表兩張影像的相似性,因此我們將 比較高景深影像與參考影像 I_r(x, y) 的 評估高景深 影像的品質,若 RMSE 值越小則代表高景深影像 品質越佳。

三、實驗結果與討論

1. 尋焦演算法表現實驗結果

樣品表面的複雜度或細緻度也決定尋焦演算法的表現,本實驗將挑選2種晶圓(wafer)樣品,分別為細緻度高、低兩類進行實驗,並觀察尋焦演

算法的表現,清晰度曲線也做過標準化的處理, 每一曲線最小值皆為0,最大值皆為1。如圖6、 7,Focal Power 的值從-3到3分別對應該值的清 晰度。藉由觀察下列尋焦演算法的清晰度曲線,可 以看出樣品表面細節複雜度越高時,尋焦演算法的 半高全寬(FWHM)解析度也會越佳,而準確度部 分,大部分樣品經過演算法的尋焦後,也能將焦距 設定調整至景深內。如表2為半高全寬解析度和影 像處理時間。

2. 距離-光焦度曲線 (Displacement-Focal Power Curve) 實驗

此實驗將可測得可變焦透鏡的光焦度 (focal power) 與待測物高度的關係。觀察晶圓樣品在 不同位置時,清晰度曲線峰值及峰值所對應到的 focal power。將待測物位置紀錄為縱軸,清晰度曲



圖 5. 不同間距的矽晶片光柵 (a) 細緻度低 (b) 細緻度高。



圖 6. 細緻度低樣品清晰度曲線 (a) 演算法 1~6 (b) 演算法 7~12。

	細緻度低 FWHM (dpt)	Time (ms)	細緻度高 FWHM (dpt)	Time (ms)
F _{abs_grad}	1.6	4.19	0.19	4.032
F _{sq_grad}	0.25	3.952	0.14	3.792
F _{Brenner}	0.25	4.243	0.14	4.138
F _{Tenen}	0.25	8.587	0.14	5.742
F _{SML}	0.2	5.858	0.12	7.472
F_{EL}	0.42	7.475	0.15	2.478
F_{M_DCT}	0.23	9.258	0.14	9.24
F_{DL}	0.42	10.61	0.16	10.527
F _{variance}	1.22	2.455	0.15	2.478
F _{nor_var}	1.15	2.395	0.14	2.403
Fauto_corr	0.68	5.227	0.14	5.285
F _{T_variance}	0.22	8.61	0.12	8.625

表 2. 細緻度低及細緻度高樣品清晰度曲線之評估數據。

線峰值所對應 Focal Power 紀錄為橫軸,最後利用 曲線擬合方法計算出表達位置與 focal power 之關 係的二次方程式。此曲線我們稱作距離-光焦度 曲線 (displacement-focal power curve)。選用晶圓作 為待測物是因為晶圓影像的細節相當多,影像細 節部分愈多,愈利於進行影像尋焦的判別。根據 A Santos⁽⁴⁾等人研究,在一般光學顯微鏡的應用中 auto correlation演算法被評估為最佳的演算法,本 實驗我們選用的尋焦演算法為 auto correlation。我 們同時利用此實驗方法計算出 10 倍物鏡下,待測 物位置與可變焦透鏡 focal power 之間的關係。如 圖 8(a) 所示,我們可利用 DF Curve 從 focal power 計算出待測物的位置。由圖 8(b) 可以觀察到待測 物的位置與 focal power 是呈現接近線性關係。在 不同倍率物鏡的條件下,量測範圍以及精度都是 不相同的,因此不同倍率的物鏡所對應到的 DF Curve 也不盡相同。

3. 多重焦點影像融合實驗

利用階梯鋁塊樣品作為待測物,觀察由本篇論 文所提出多重焦點影像融合演算法的表現。





圖 7. 細緻度高樣品清晰度曲線 (a) 演算法 1~6 (b) 演算法 7~12。

心提供階梯鋁塊樣品,該樣品為階梯形狀,其階梯 高度為 50 至 100 μm 如圖 9,階梯樣品的表面高度 落差大,因此就算是使用 10 倍放大率的透鏡,也 難以拍攝出對焦良好的影像。本實驗所使用之物鏡 放大倍率為 10 倍,圖片解析度為 640 × 512,取樣 範圍為 0.8 dpt 至 1.8 dpt,取樣張數為 100 張影像。

由圖 9(b)(c) 可以看出因為攝影系統景深有限,因此無法在單張影像拍攝出品質良好的影像, 但透過多重焦點影像融合技術能夠克服景深有限的 問題,能夠從不同焦距的影像生成出高景深影像, 如圖 9(d),所使用之參數為本文所得出的最佳參 數,使用 $F_{abs\ grad}$ 在 c = 28 的條件下。

本篇論文使用的高景深影像質量評估的方法, 首先以人工判別的方式將階梯鋁塊影像中,每一區 域分割並標記,接著利用尋焦演算法判定每一區域 最清晰的影像。將影像合成後我們稱其為參考影像 (reference image),最後計算不同參數下,所生成 影像與參考影像的 RSME 值做為評估的指標,輸 入影像與參考影像的 RMSE 值越小,代表品質越 佳。

參數 c 對多重焦點影像融合演算法之影響 探討

c 為本研究所提出之演算法的一個重要參數, 其定義為選定任一像素為中心,作出(2c+1)×(2c +1)二維矩陣並摺積,若參數c過小,所生成之高 景深影像會有非常多的雜訊,尤其是在細節度較低 的區域,比如曝光不足或是過度曝光的區域,但若 參數c過大,仍然會惡化演算法結果,如圖 11(a) (b)。分別對應不同的參數c



圖 8. (a) 10 倍物鏡下,待測物不同位置的清晰度曲線 (b) 位置與 focal power 之關係,黑色線為原始數據圖, 紅色線為擬合曲線。



圖 9. 階梯銘塊以及系統所拍攝之影像 (a) 單接階梯寬度 500 μm 階梯銘塊樣品 (b) 對焦在上方階梯區域影像 (c) 對焦在下方基座區域之影像 (d) 演算法生成高景深影像。





(C)

圖 10. (a) 影像分割區域 (b) 不同區域尋焦演算法曲線 (c) 參考影像。

本實驗將著重在不應用高通濾波器的情況下, 所得出以不同尋焦演算法為基礎的多重焦點影像融 合方法,在不同參數 c 的情況下,與參考影像的誤 差關係,本節影像解析度皆為640×512。

圖 12 為均方根誤差和參數 c 的關係曲線。由 圖 12 可以看出大部分演算法在 c 值較小的時候 RMSE 值較大, 隨著 c 值增大,大部分的 RMSE 值也會隨之變小,但若 c 值過大 RMSE 值也會隨 之增大。其中表現較為特別的有 F_{SMI} 演算法,該 演算法 RMSE 值在 c = 60 附近較大,在深入探討 後,發現該演算法在影像的邊界部分表現較差。如 圖 12 以及表 3,最佳的演算法以及參數為 Fabs grad 在參數 c = 28 時, 達到最小的 RMSE 值。

5. 形貌量測

本實驗利用 5 倍透鏡進行階梯寬度為 500 µm 階梯鋁塊形貌的量測,形貌量測方法與多重焦距影 像融合,兩者重點皆為最清晰像素的判別,而差別 在於多重焦距影像融合著重於判別出最清晰像素以 利生成高景深影像,形貌量測演算法著重於最清晰 像素所對應到之可變焦透鏡光焦度,前文所提出 之演算法生成的 focal power index D(x, y) 紀錄每一 位置最清晰像素所對應到的 focal power, 接著藉由 DF curve 將光焦度轉換為樣品的垂直高度資訊,進 而繪製出形貌。

根據實驗結果,光焦度與距離之間的關係接 近線性關係,因此能夠從 D (x, y) 觀察到樣品高



(b)

圖 11. 不同的 c 值所產生的影像 (a) c = 1 (b) c = 100。



表 3. 未應用高通濾波器下,最佳參數 c 以及其對應到的 RMSE 值。

演算法	最佳參數 c	最小 RMSE 值
Fabs_grad	25	433324
F _{sq_grad}	13	654388
FBrenner	44	506336
F _{Tenen}	31	701664
F _{SML}	5	1265281
F_{EL}	20	757512
F_{M_DCT}	27	598399
F_{DL}	29	695802
Fvariance	18	1090568
F _{nor_var}	28	950929
Fauto_corr	81	702847
$F_{T_variance}$	31	1393836

表 4.

Magnification	Range	Resolution (FWHM)	Fitting curve
5X	8000 µm	80 µm	$f(x) = 33x^2 + 1301x + 3810$
10X	2000 µm	19 µm	$f(x) = 7x^2 + 317x + 914$



圖 13. *F_{abs_grad}* 演算法以及參數 *c* = 28 所生成的階梯鋁塊形貌資訊 (a) Focal Power Index *D* (*x*, *y*) (b) 經 5 倍透鏡 DF curve 轉換方程式所計算出的物 體形貌資訊。

度資訊,接著套入表 4 的 5 倍透鏡 displacementfocal power curve 的轉換方程式為 displacement = 33 $(dpt)^2 + 1301 dpt + constant, 樣品形貌即可被建$ 立,如圖 13(a)。

6. 曲面樣品之量測實驗

為了測試基於可變焦透鏡之攝影系統方法是否 能夠量測曲面樣品,本小節將呈現利用本篇論文所 提出之方法進行圓柱曲面的量測結果,量測樣品的 曲面直徑為 1.96 mm 如圖 14 所示。而圖 15 為不 同焦距設定的圓柱樣品影像、高景深影像以及深度 圖 (focal power index)。利用游標尺量測出圓柱樣



圖 14. 圓柱曲面樣品。

品直徑後,以該直徑所繪製出的半圓形輪廓作為理 論值,如圖16 (b)所示,而由本系統所量測出的實 驗值則可與理論值做比較。本實驗所使用之參數為 F_{abs_grad} 、c = 28取樣張數為 500,量測範圍為 0 至 1 dpt,所使用之物鏡倍率為 10 倍物鏡。

四、結論

本篇論文利用尋焦演算法在可變焦攝影系統 中,開發出初步電控尋焦功能,尋焦演算法配上可 變焦透鏡,再利用粗取樣以及兩次細取樣的方法可 以得到一定的修正,並找出攝影系統最佳的焦距設 定。本研究利用尋焦演算法以及影像處理的方式建 立出光焦度與垂直距離間的關係。基於尋焦演算法 開發出多重焦點影像融合的功能,同時利用 RMSE 方法以及階梯鋁塊找出最佳的參數設定,提供不同 演算法所需的時間以及不同參數下其 RMSE 值的 變化,藉由該實驗找出相對最佳的參數以及演算 法,由實驗結果可以得知最佳參數為利用 *F_{abs_grad}* 演算法在 *c* = 28,在實驗數據中最後呈現各種樣品 的量測結果,可以看出此方法初步達成樣品形貌輪 廓的建立,但解析度仍有些不足。





圖 15. 不同焦距的圓柱影像、高景深影像以及深度圖 (a) 上方區域在景 深內 (b) 側邊區域在景深內 (c) 高景深影像 (d) 深度圖 (Focal Power Index *D* (*x*, *y*))。



圖 16. 樣品量測 (a) 圓柱樣品量測結果 (b) 實驗值與理論值比較,解析度限制較靠近邊緣的區 域解析的較差,但大部分的實驗值與理論值吻合的良好。

誌謝

感謝科技部 (MOST 106-2622-E-492-004 -CC3 及 107-2221-E-492 -024 -MY3) 提供研究經費上的 支持。

參考文獻

- 1. Rita Beltrán Catalán, Eduardo Islas Pérez, Benjamin Zayas Pérez, "Evaluation of 3D Scanners to Develop Virtual Reality Applications," 於 CERMA, 2007.
- 2. Reinhard Danzl, Franz Helmli, Stefan Scherer, Journal of

Mechanical Engineering, 57, 245 (2011).

- 3. Shree K. Nayar, Yasuo Nakagawa, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **16**, 824 (1994).
- 4. A. Santos, Journal of Microscopy, 188, 264 (1997).
- 5. Yu Sun, Brad Nelson, *Microscopy Research and Technique*, **65**,139 (2004).
- Di Guo, Jingwen Yan, Xiaobo Qu, *Optics Communications*, 338,138 (2015).
- Wei Huang a, Zhongliang Jing, *Pattern Recognition Letters*, 28 (9),1123 (2007).
- 8. Bastien Billiot, et al., Sensors, 13 (4), 5040 (2013).
- 9. Pavel Pavliček, Ivana Hamarová, Applied Optics, 54(33), 9747(2015).
- Fan Tiantian, Yu Hongbin, Optics Communications, 410, 254 (2018).
- 11. Andrea Thelen, et al., *IEEE Transactions on Image Processing*, **18** (1), 151 (2009).
- 12. Ö. Tan, "Characterization of Micro- and Nanometer Resolved Technical Surfaces with Function-oriented Parameters," 2012.
- 13. Sang-Yong Lee, et al., "Enhanced Autofocus Algorithm Using Robust Focus Measure and Fuzzy Reasoning," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1237 (2008).
- 14. J. L. Pech-Pacheco, et al., "Diatom autofocusing in hrightfield microscopy: a comparative study," *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition*, 2000.
- 15. Please refer to the web site:
- https://www.edmundoptics.com/f/EO-USB-2.0-CMOS-Machine-Vision-Cameras/13347/
- Brigitte Forster, et al., *Microscopy Research and Technique*, 65 (1-2), 33 (2004).



范振亮先生現為國立交通大學機械所 碩士生。

Chen-Liang Fan is currently a M.S. student in the Department of

Mechanical Engineering at National

Chiao Tung University.



林敬烜先生現為國立交通大學機械所 碩士生。

Jing-Xuan Lin 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,現為國立交通大學機械系副 教授。

Pi-Ying Cheng received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National

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 所博士,現為國家實驗研究院台灣儀 器科技研究中心研究員兼任光學儀器 小組長。

Chun-Jen Weng received his Ph.D. in

Electro-optical Engineering from National Chiao Tung University. He is currently a research fellow at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

致謝啟事

本人撰寫並載於科儀新知 217 期福爾摩沙衛星五號專刊之文章「光學遙測酬載」,相 關內容主要為計畫相關人員之專業成果。光學遙測酬載為國家太空中心各次系統依分工, 多年努力的研製成果。計畫相關專業內容之負責人員包括國家太空中心郭人爵、洪珩瑑、 黃正德、陳宗耀、何承恩、林信嘉及羅詩鴻等人,特此聲明並且致謝相關作者。

國家太空中心系統工程組黃柏瑄