

數位光學與黃光微影技術 應用於製作滾筒模具

本研究建置一套應用於滾筒曲面表面的無光罩式曝光系統，以數位光學與黃光微影技術應用於製作滾筒模具之製程技術，並透過數位光學處理 (Digital Light Process; DLP) 技術取代傳統光罩，使用無光罩曝光系統於滾筒表面上的光阻層直接進行曝光，利用光點陣列式斜掃描曝光技術達到增加橫向解析度目的，使無光罩曝光可定義更複雜的二維圖形結構，結合黃光微影系列製程，於滾筒表面定義出無接縫且任意完整複雜圖形且最小線寬 $20\ \mu\text{m}$ 的二維光阻結構，並依據此光阻結構，後續利用蝕刻的方式，製作最小線寬 $40\ \mu\text{m}$ 深度 $10\ \mu\text{m}$ 之二維任意結構，完成滾筒模仁之製作。

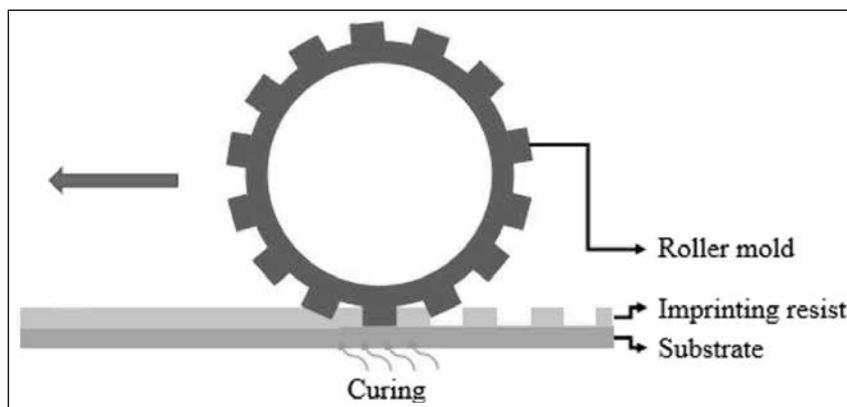
■ 陳致豪、李永春

關鍵詞：無光罩曝光技術、光點陣列式斜掃描曝光技術、二維任意電路圖形、無接縫滾筒模仁

滾印技術 (Roller Imprinting) 是項歷史悠久的技術，公元前約 3500 年，古代美索不達米亞南部的烏魯克地區出現了雕刻精美的滾筒印章 (Cylinder Seal)，當時人們就曾在泥板上滾印出各樣式的圖形，代表持有者的身分與其簽名，具有快速與方便的優點。時至今日，滾印技術仍然因為其高成本效益的生產力特性，而被傳統產業大量運用在聚合物材料、紙張、人造皮革…等的表面印花技術中。而近年來隨著奈米世代來臨，奈米壓印技術持續發展，奈米滾印製程技術也隨之應運而生，使滾印技術應用範圍更加廣泛。

現今的壓印技術 (Imprint Lithography) 可分為兩類：平面壓印技術 (Flat Imprint Lithography)；滾印製程技術 (S. H. Ahn et al, 2009、L. P. Yeo et al, 2010、C. H.

Chuang et al, 2011、T. H. Chou et al, 2012)，如圖一。相較於平面壓印技術，滾印製程技術具有大面積、低成本、快速且連續的轉印結構的優點。此外，滾印技術非常適合在軟性基板上轉移特徵結構，與當今的光電產業中，為了符合曲面或是可捲式軟性顯示器而使用軟性薄型材料的需求不謀而合，因此，滾印製程技術被廣泛應用在光電產業當中，應用領域涵蓋了印刷電路板、觸控面板、光學膜、導光背板、軟性顯示器、軟性太陽能面板等產品。



圖一 滾印製程技術示意圖

歸納近年來學者提出的滾筒模仁製程技術，可依照滾筒模仁最終表面是否有接縫分為兩種：平面模仁滾筒包覆技術與曲面模仁直寫技術；平面模仁滾筒包覆技術主要精神為，將特徵結構以各樣式方法，製作在薄型可撓曲的平面薄膜上，後續直接包覆或以鑄模方式轉印至滾筒表面，完成滾筒模仁製作 (H. Tan, 1998、N. Ishizawa et al, 2008、S. Y. Yang et al, 2008、L. T. Jiang, 2008、M. D. Fagan et al, 2009)。使用平面模仁滾筒包覆技術製作之滾筒模仁，在包覆接點處必然產生接縫，導致後續滾印時產生結構不連續的現象；曲面模仁直寫技術則可以達成「無縫滾筒」的製作，本研究同屬此類。曲面模仁直寫技術的製作方式多種多樣，包含直接接觸滾筒模仁，使用鑽石刀具直接於滾筒模仁表面進行切削的超精密雕刻法、同樣使用鑽石模具以蓋印章的方式直接於滾筒模仁表面撞擊，使模具表面結構轉印在滾筒模仁上的曲面壓印打凹法 (N. Cates et al, 2021)、透過黃光微影製程衍生的各項滾筒模仁製作方法 (T. Katoh et al, 2001、J. Taniguchi et al, 2009、Y. C. Lee et al, 2012、S. W. Tsai et al, 2014、S. W. Tsai et al, 2016、C. Ji et al, 2018、Y. C. Lee, 2019、Y. C. Lee et al, 2021)。

上述曲面模仁直寫技術成功解決滾筒模仁滾印時產生結構不連續的現象，但在各項製程中仍存在的許多困難與缺點，例如：高成本、加工時間長、加工失敗率高、滾筒尺寸存在限制、只能製作週期性的光阻結構…等。然而，現今產業界有著結構尺寸微小化、非週期性圖形變化、大面積的需求，現有滾筒模仁製程技術的改良與新技術的研發勢在必行，因此本研究提出以「數位光學與

黃光微影技術製作滾筒模仁之製程技術」，建置一套滾筒式的無光罩曝光系統直接於滾筒模仁表面進行無光罩式曝光。

背景系統與關鍵技術

本研究使用現有的三項背景系統與關鍵技術，分別為：曲面光阻噴塗系統、數位光學處理系統、光點陣列式斜掃描曝光技術。曲面光阻噴塗系統以加壓噴塗的方式在滾筒模仁表面完成均勻且快速的光阻塗佈；無光罩曝光系統中應用現有的數位光學處理系統 (DLP) 搭配數位微鏡面裝置 (DMD) 正反轉控制決定光點的亮暗，並藉由光點陣列式斜掃描曝光技術，完成針對滾筒模仁上塗佈之光阻層的任意圖形之定義。

一、曲面光阻噴塗系統

本研究將滾筒架至於改裝後的小型車床，商用噴槍 AirPro EFXTM (GRACO Corp., Minneapolis; USA) 取代車刀，架置於進給車刀座上，使噴槍可等速的沿著滾筒軸心方向移動，之後將稀釋過後的光阻靜置於光阻供給系統的腔體內，透過外接氣壓將光阻經由導管傳遞至噴槍，並於噴槍噴嘴處也外接高壓氣體，以氣體噴幅、光阻霧化的形式在滾筒持續旋轉且噴槍等速的沿著滾筒軸心方向移動狀態下，於滾筒模仁表面噴塗一層均勻光阻。

二、數位光學處理系統

數位光學處理系統 (Digital Light Processing system; DLP system) 為本研究重要的關鍵技術之一。DLP 最早為美商德州儀器 (Texas Instruments, TI) 於 1987 年開發的技術，此技術使用的關鍵元件是一種由二位元脈衝調變來控制的半導體基準元件—數

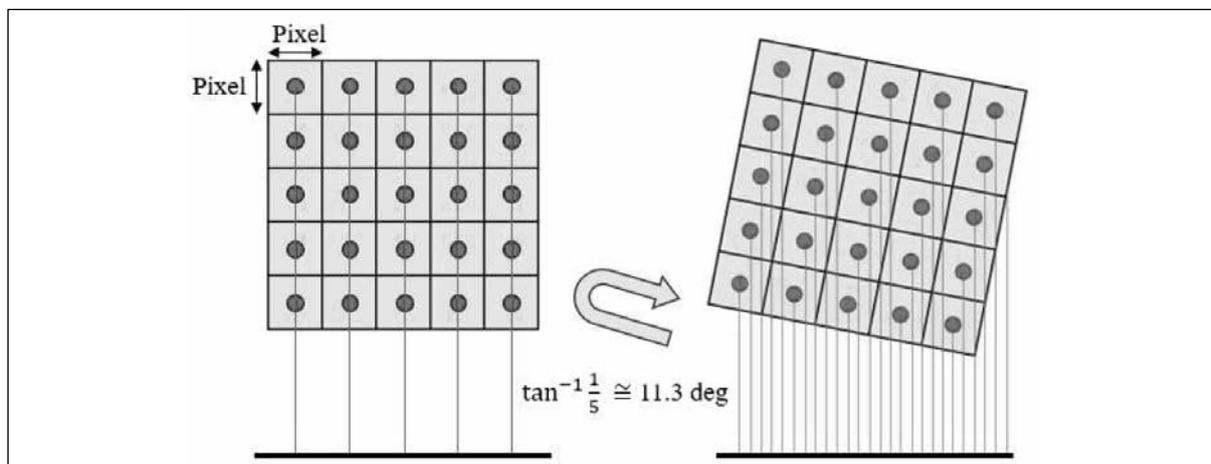
位微反射鏡元件 (Digital Micro-mirror Device; DMD)，而 DMD 鏡面是由數十萬甚至數百萬個微反射鏡面以陣列排列方式所組成，DMD 每一個微反射鏡都以鏡面的 45 度對角線作為軸線，由控制板以控制電壓的方式決定微反射鏡的正轉 (+12°) 與反轉 (-12°)，經由正反轉的角度差異使入射光反射至不同角度。近年來，有許多學者研究，將 DMD 應用於數位光學成像系統取代傳統光遮罩，發展出無光罩的微影技術 (R. Menon et al, 2005、C. Peng et al, 2019)。

三、光點陣列式斜掃描曝光技術

光點陣列式斜掃描 (Light Point Array and Oblique Scanning) 是以 DMD 為基礎所開發的一種平面的無光罩曝光方法，本研究則將此法應用於滾筒模仁曝光製程。藉由控

制 DMD 上每一個微反射鏡狀態，將在 On 狀態所反射出的紫外光投射進入成像鏡組，使紫外光於成像平面上形成光點陣列，將此光點陣列於曝光製程中與拖拉方向傾斜一固定角度並拖拉掃描曝光，即為平面之光點陣列式斜掃描曝光技術核心概念。

本研究使用數位光學處理系統於滾筒模仁旋轉狀態下執行曝光製程，曝光圖形的水平解析度直接受限於 DMD 的掃描線間距，因此本研究採用光點陣列式斜掃描曝光技術，搭配理想角度，大幅降低相鄰掃描線的間距，達到增加水平曝光解析度的目的，如圖二；針對此法所存在之光學成像鏡頭畸變與像差所造成之誤差與缺陷，本研究直接量測鏡頭出口之真實光點陣列，並建立真實光點座標，用於曝光圖形拆圖製程中。

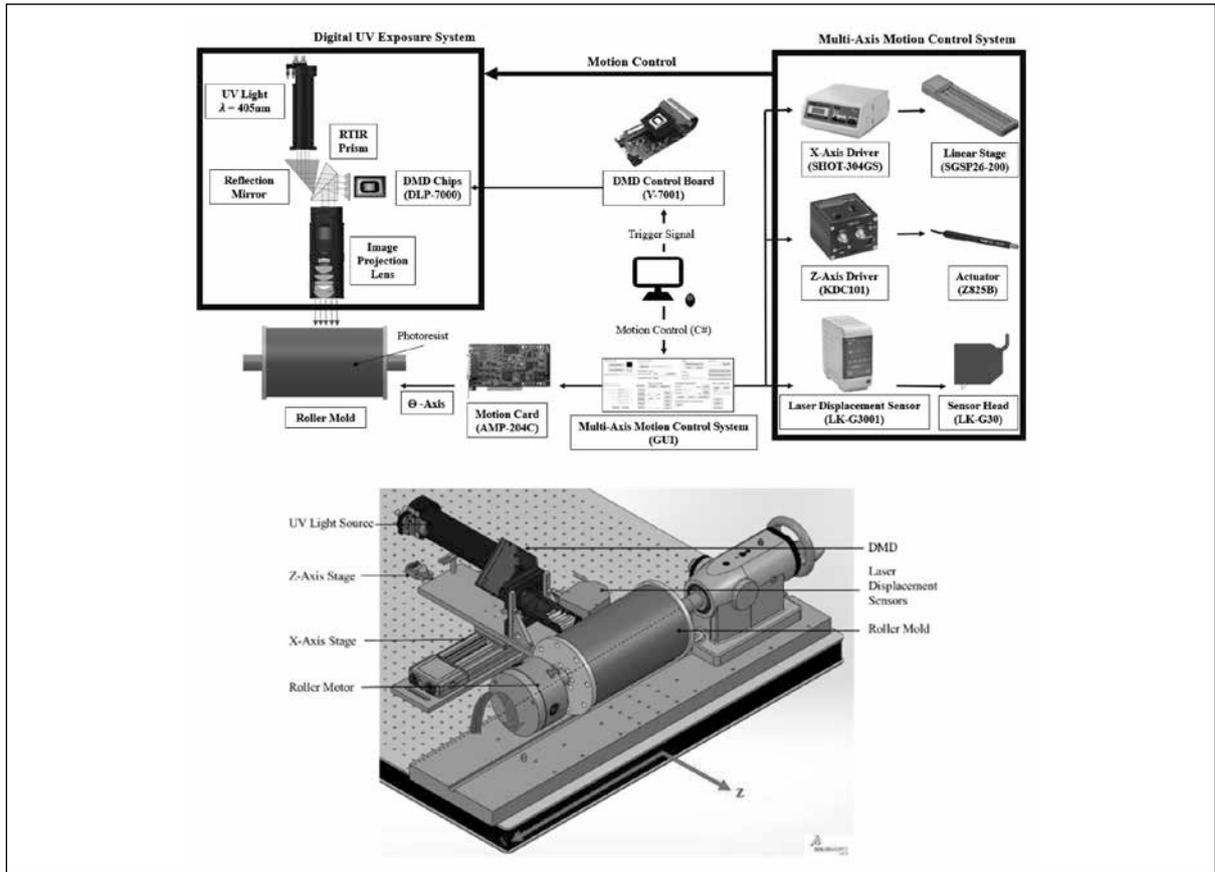


圖二 透過光點陣列斜掃描技術旋轉 DMD 增加水平曝光解析度示意圖

滾筒式無光罩曝光系統

本研究所開發的「滾筒式無光罩曝光系統」如圖三所示，系統主要由光學引擎系統與多軸運動控制系統。由 UV-LED 光源產生波長為 405nm 的光線，接著經由反轉式全反射稜鏡 (Reverse-type Total Internal

Reflector, RTIR)，將光線投射至 DMD 的微反射鏡鏡面，透過 DMD 的控制板決定哪些微反射鏡應該處於 ON-State 的姿態，處於 ON-State 的姿態的這些微反射鏡將光線繼續向下傳遞至光學成像鏡組，最後經由光學鏡組將 DMD 之像素資訊成像至滾筒模仁光阻表面，定義圖形結構。



圖三 整體曝光機台架構示意圖

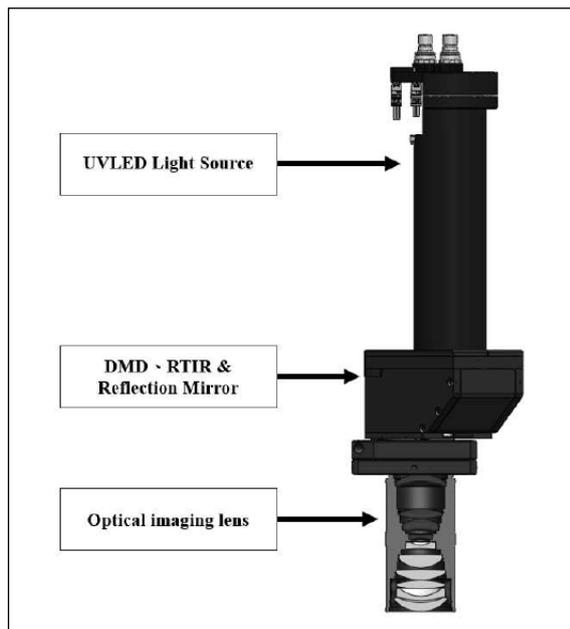
本研究設有兩個軸向運動控制 (X-axis、Z-axis) 與一個旋轉運動控制 (θ -axis)，並以程式 C# 整合為多軸運動控制系統，此系統搭配雷射位移計 (Laser Displacement Sensors) 量測光學引擎系統與滾筒模仁光阻表面間的距離，並以致動器前後推動光學引擎系統 (即 Z-axis)，確保 DMD 投射而成的像保持在滾筒模仁表面，保證整體系統的曝光穩定。由於光學引擎系統的曝光區域寬度無法涵蓋整支滾筒模仁長度，需要沿著滾筒模仁的軸心方向橫向移動 (即 X-axis)，因此每當滾筒模仁完成旋轉曝光一圈 (即 θ -axis)，光學引擎系統會透過移動平台位移一個曝光區域寬度，以此完成整個滾筒表面圖形結構的定義。

光學引擎系統與多軸運動控制系統的連動關鍵在於本研究使用的運動控制卡，

此運動控制卡與 DMD 控制卡連接，當多軸運動控制系統中的滾筒模仁旋轉一個固定角度時，便觸發一個脈衝訊號給 DMD 控制卡，每個觸發訊號會使 DMD 翻圖一次，即 DMD 中的所有微反射鏡將依照提早匯入 DMD 控制卡的 BMP 圖檔像素資訊，各別進行翻轉 ($\pm 12^\circ$)，因此達成滾筒模仁邊轉動邊進行曝光。

一、光學引擎系統架構

光學引擎系統主要由波長 405 nm 的 UV-LED 光源系統、數位微鏡面反射裝置與光學成像鏡組所組成，架構如圖四所示，紫外光經由反轉式全反射稜鏡以特定角度將紫外光投射至 DMD 微鏡面上，並由 DMD 上的微反射鏡傳遞至光學成像鏡組，最後成像至滾筒模仁表面。

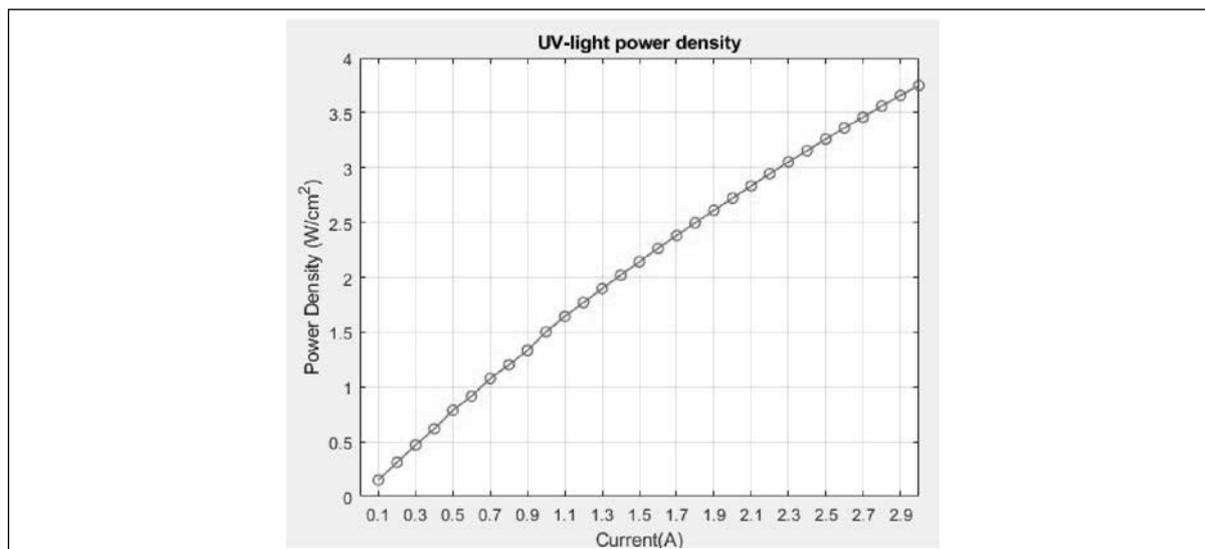


圖四 光學引擎系統架構示意圖

光學引擎系統中的光源系統以透過控制電流大小方式調整光源能量強度，本研究透過調整光源電流方式量測光學引擎系統光源之能量密度，如圖五，後續搭配光阻型錄中記載的不同光阻膜厚曝光所需劑量，實現曝光製程的曝光劑量精準控制。

二、數位微鏡面反射裝置

本研究所使用的 DMD 開發套件為德國公司 ViALUX 基於高速模組 (DLP®Discovery™ 4100)，所開發的極速模組—V-7001，控制板型號為 V4395，DMD 型號為 DLP-7000(XGA)，由 1024×768 個



圖五 光學引擎系統之光源能量密度結果圖

微反射鏡做陣列所組成，週期大小為 $13.68 \mu\text{m}$ ，控制板藉由外部觸發訊號，使 DMD 依照預先載入的圖檔像素值來決定為反射鏡面的開與關。

三、光點量測

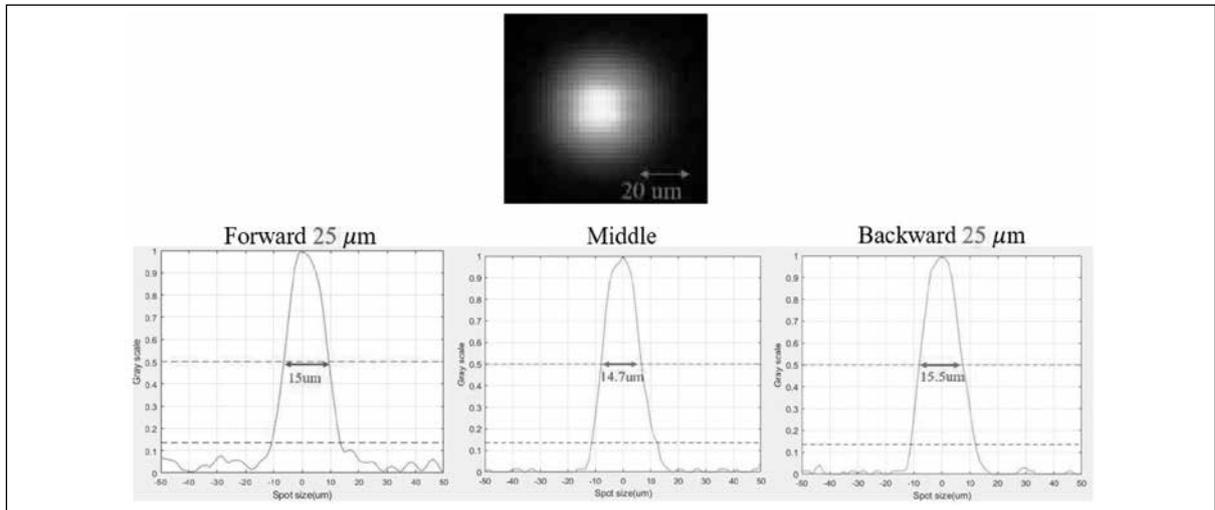
本研究目標為滾筒模仁之曲面，而曝光區域相對於滾筒半徑小許多，因此本研究以

模仁曲面切線之微小面積為目標曝光區域，並視為在一平面並進行曝光，本研究選擇使用 DMD 中間橫排之 1024×20 的反射鏡數量做為微小面積曝光區域，且將 DMD 旋轉相對應之斜掃描角度 2.862 度。

使用 CCD 進行觀察與紀錄，以光點於影像中之灰階值繪製光點形貌，並以半峰全寬定義光點大小，透過致動器推動光學引擎

系量測灰階值並觀察光點形貌。將量測半峰全寬小於 $16\ \mu\text{m}$ 之光點視為可用於曝光之光點，得到可用光點之景深範圍約為 $50\ \mu\text{m}$ ，如圖六。另外，本研究使用 CCD 於清晰

成像面紀錄選用光點 (即 1024×20 大小之 DMD)，透過影像處理方式取得光點中心位置，將其紀錄為光點座標，此光點座標應用於後續拆圖。



圖六 光點形貌與大小量測

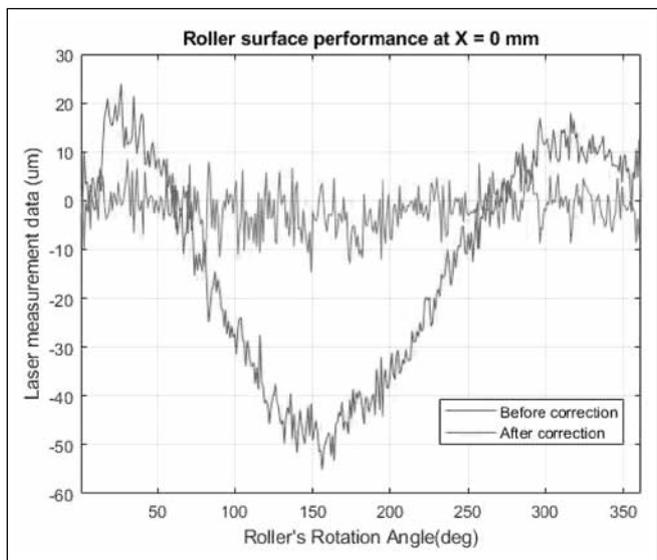
四、多軸運動控制

本研究所使用運動控制卡 AMP-204C (ADLINK Technology Corp., Taipei; Taiwan) 控制滾筒的轉動，並利用馬達的回授訊號作為位置比較觸發訊號依據，使滾筒在轉動的同時輸出觸發訊號，觸使滾筒模仁轉動同時 DMD 圖形也隨著等量角度的增加發生變換。且由於光學引擎系統的曝光區域寬度無法涵蓋整支滾筒模仁長度，因此必須控制高精度位移平台於平行滾筒模仁軸心的方向移動，進一步於整支滾筒表面都製作出微結構。

五、滾筒式無光罩曝光系統運作檢驗

為了穩定本系統曝光品質，本研究使用雷射位移計於光阻表面進行完整量測，建置一個曝光前之量測資料檔，並透過此資料檔運算得出致動器補償表格，接

著以查表格方式使致動器進行位移補償，即完成本研究之滾筒式無光罩曝光系統之運作檢驗，如圖七。本研究使用致動器補償，於滾筒轉速 $0.1\ \text{rpm}$ 下，將原本 $\pm 40\ \mu\text{m}$ 的曝光面位移壓縮至 $\pm 12.5\ \mu\text{m}$ ，大幅減少曝光面位移變化量，穩定本系統曝光品質。



圖七 致動器補償系統補償量測結果圖

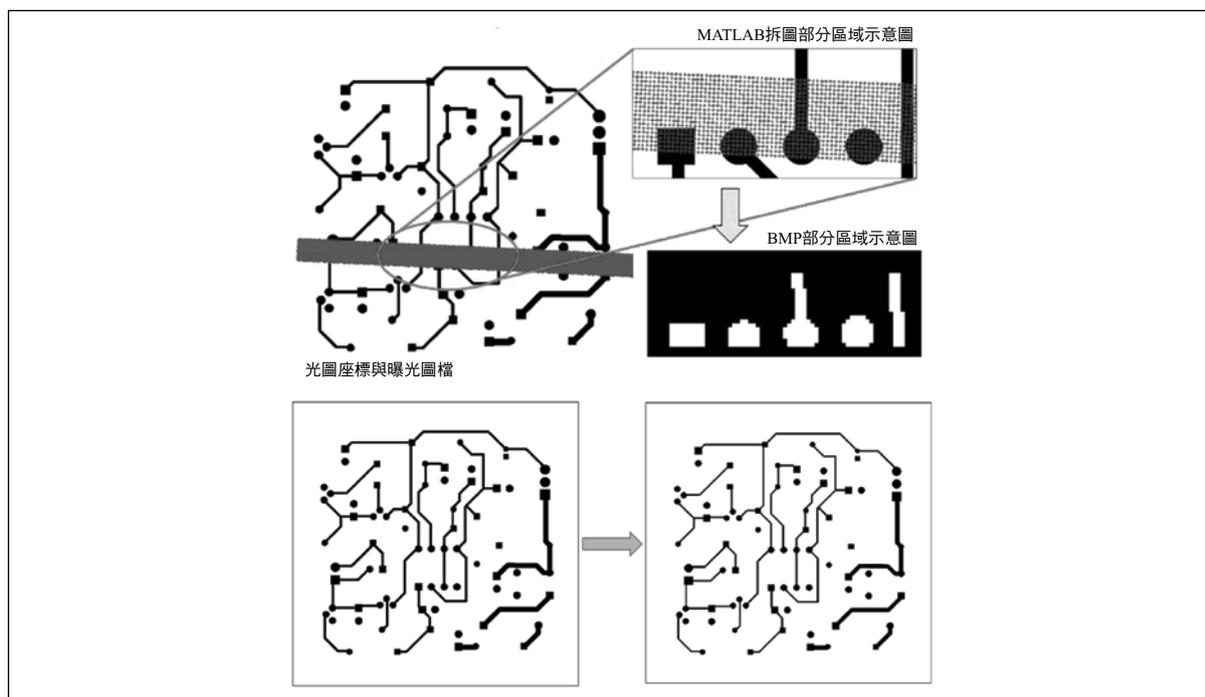
二維任意圖形製程

本研究於金屬滾筒模仁銅表面製作二維任意圖形結構，透過黃光微影方式定義二維任意圖形、蝕刻方式製作二維任意微米結構，最後利用 PDMS 翻模可以近乎完美的複製滾筒模仁表面形貌，並使用雷射共軛交顯微鏡量測結果。本研究製程成功於滾筒模仁光阻表面製作出最小線寬 $20\ \mu\text{m}$ ，且蝕刻後最小線寬 $40\ \mu\text{m}$ 深度 $10\ \mu\text{m}$ 完整電路圖形。

一、拆圖與蝕刻預估補償

本研究建立一套拆圖方法，將電路圖形視為研究目標之二維任意圖形，結合所量測之光點座標，將電路圖形之向量圖檔 (Gerber) 之最小線寬位置設定為 $40\ \mu\text{m}$ 決定

圖檔尺寸，並以 Pixel Size $0.5\ \mu\text{m}$ 為解析度轉換為 PNG 圖檔，接著將光點座標疊放至 PNG 圖檔上方，設定曝光步進距離，再設定整體拆圖張數，最後以迴圈方式查找每一步進光點座標之每一光點對應 PNG 圖檔數值 (即黑區對應光點為開，對應 DMD 應正轉 12 度，將光導入光學成像鏡組進行曝光)，並輸出 BMP 圖檔，以遞增序列命名檔案，完成拆圖步驟，後續輸入至 DMD 控制板。然而濕蝕刻存在著不可避免的等向性側蝕問題。本研究採取預測策略，將曝光目標圖形透過 MATLAB 進行捲積，成功在不改變大致尺寸與特徵位置下縮短線寬，達到蝕刻後仍然蝕刻出與研究目標圖形一致的微米結構與特徵，如圖八所示。



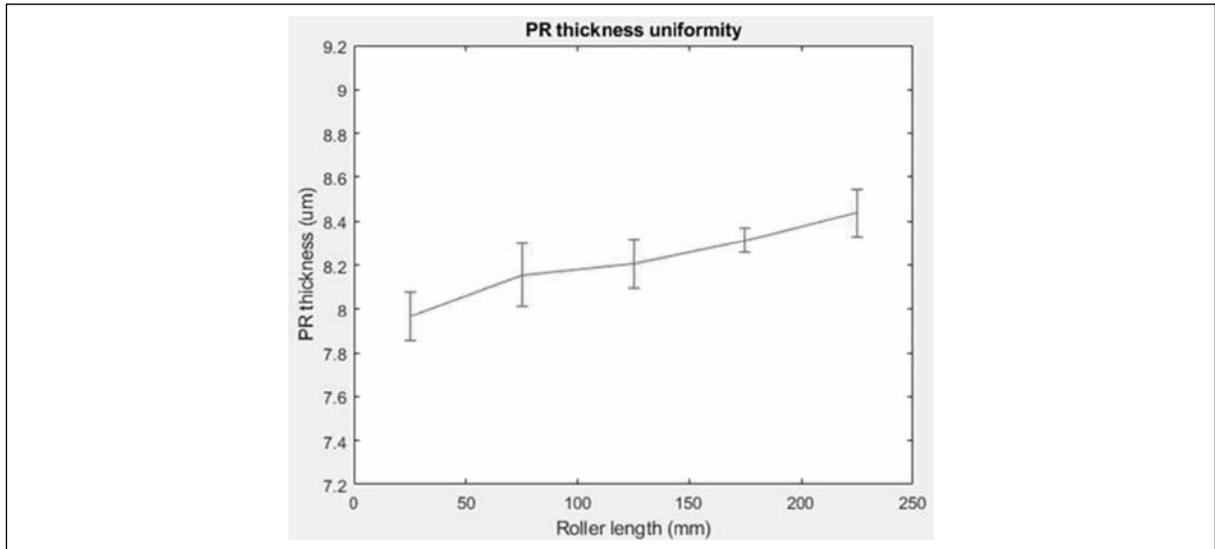
圖八 拆圖製程與捲積法預估補償結果示意圖

二、黃光微影製程

本研究使用黃光微影製程可大致依序為滾筒模仁表面光阻噴塗、曝光、顯影、硬烤，接著透過氯化鐵針對金屬銅進行蝕刻。

(一) 曲面光阻塗佈量測與結果

本研究完成曲面光阻塗佈，並透過軟性光罩進行曝光，經過黃光微影系列製程後量測 PDMS 翻模結果，量測結果如圖九所示。本研究噴塗之光阻膜厚約為 $8\text{-}8.5\ \mu\text{m}$ 。



圖九 九光阻膜厚均勻度量測結果

(二) 無光罩曝光

將拆圖所得 BMP 圖檔直接匯入至 DMD 控制板，利用運動控制卡之高速位置比較觸發訊號與旋轉伺服驅動器回授訊號，完成每步進距離 10 μm ，控制板立即轉動 DMD 翻圖，曝光時，滾筒模仁以 785 $\mu\text{m}/\text{s}$ (0.1 rpm) 等速旋轉，於滾筒模仁光阻膜厚為 8-8.5 μm 時，光源系統應將電流調整至 2.7 A，曝光劑量為 1108 mJ/cm^2 ，以此參數進行曝光製程。

(三) 顯影

本研究使用顯影液 AZ300K，以浸潤式方式進行曝光後的顯影製程，以 150 rpm 的等速旋轉滾筒模仁，並浸入裝有顯影液之壓克力槽體中 60 秒，使用去離子水 (Deionized Water) 清洗滾筒模仁表面殘留顯影液，完成顯影製程。

(四) 硬烤

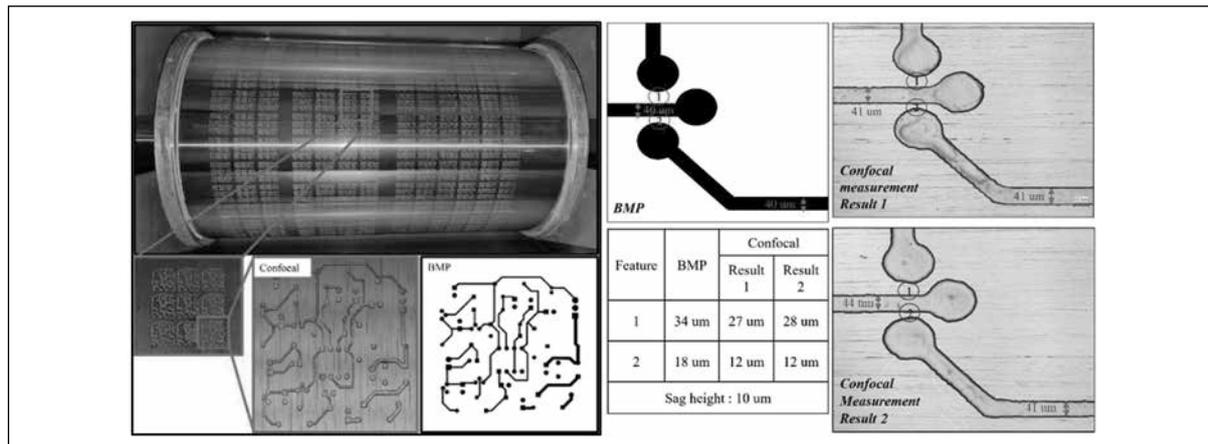
為了去除光阻層中剩餘的溶劑，增強光阻層的附著力與抗蝕刻能力，本研究於顯影製程後接著進行硬烤製程，利用烤箱將溫度調節至 80 $^{\circ}\text{C}$ ，等待烤箱穩定後將滾筒模仁置入烘烤 30 分鐘，最後放置於室溫進行冷卻。

(五) 蝕刻

本研究使用曲面光阻噴塗系統中的雙軸運動機構以浸潤式且等速旋轉之方式進行蝕刻製程，本研究以約 60 rpm 之速度，等速旋轉浸入氯化鐵溶液之壓克力槽 20 秒，將原設計之最小線寬 30 μm 蝕刻出 40 μm ，深度 10-12 μm 之完整電路結構。

三、翻模與結果量測

本研究使用 Confocal 可以針對曲面量測結果進行軟體校正，因此本研究以 PDMS 軟模轉寫滾筒表面結構並量測，如下方圖十。



圖十 二維任意電路圖形蝕刻結果

結論

本研究提出一套將數位光學應用於滾筒表面之黃光微影製程，並組建滾筒式無光罩曝光系統，利用此系統曝光後進行浸潤式的濕蝕刻；建立簡單且快速的拆圖方法並加入捲積法預估補償蝕刻等向性側蝕問題，成功製作具有完整結構之滾筒模仁，此滾筒模仁未來可直接運用於滾印製程，因此本技術具有明確的實用性與價值。

參考文獻

1. S. H. Ahn and L. J. Guo, "Large-area roll-to-roll and roll-to-plate nanoimprint lithography: A step toward high-throughput application of continuous nanoimprinting", *ACS Nano*, vol. 3, no. 8, pp. 2304-2310, 2009.
2. C.-H. Chuang, S.-W. Tsai, J.-F. Lin, and C.-P. Chen, "Fabrication of multi-functional optical films by using a ultraviolet curing roll-to-roll system," *Jpn. J. Appl. Phys.* (2008), vol. 50, no. 6S, p. 06GK01, 2011.
3. L. P. Yeo et al., "Investigation of hot roller embossing for microfluidic devices," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 20, no. 1, p. 015017, 2010.
4. T.-H. Chou, K.-Y. Cheng, C.-W. Hsieh, and Y. Takaya, "Roll-to-roll fabrication of a low-reflectance transparent conducting oxide film with subwavelength structures," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 22, no. 4, p. 045009, 2012.
5. M. D. Fagan, B. H. Kim, and D. Yao, "A novel process for continuous thermal embossing of large-area nanopatterns onto polymer films," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 246-256, 2009.
6. H. Tan, "Roller nanoimprint lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. Process. Meas. Phenom.*, vol. 16, no. 6, p. 3926, 1998.
7. N. Ishizawa, K. Idei, T. Kimura, D. Noda, and T. Hattori, "Resin micromachining by roller hot embossing," *Microsyst. Technol.*, vol. 14, no. 9-11, pp. 1381-1388, 2008.
8. S.-Y. Yang, F.-S. Cheng, S.-W. Xu, P.-H. Huang, and T.-C. Huang, "Fabrication of microlens arrays using UV micro-stamping with soft roller and gas-pressurized platform," *Microelectron. Eng.*, vol. 85, no. 3, pp. 603-609, 2008.
9. L.-T. Jiang, T.-C. Huang, C.-Y. Chang, J.-R. Ciou, S.-Y. Yang, and P.-H. Huang, "Direct fabrication of rigid microstructures on a metallic roller using a dry film resist," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 18, no. 1, p. 015004, 2008.
10. N. Cates et al., "Roll-to-roll nanoimprint lithography using a seamless cylindrical mold nanopatterned with a high-speed mastering process," *Nanotechnology*, vol. 32, no. 15, p. 155301, 2021.

11. T. Katoh, N. Nishi, M. Fukagawa, H. Ueno, and S. Sugiyama, "Direct writing for three-dimensional microfabrication using synchrotron radiation etching," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 89, no. 1–2, pp. 10–15, 2001.
12. J. Taniguchi and M. Aratani, "Fabrication of a seamless roll mold by direct writing with an electron beam on a rotating cylindrical substrate," *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. Process. Meas. Phenom.*, vol. 27, no. 6, pp. 2841–2845, 2009.
13. S.-W. Tsai, P.-Y. Chen, S.-R. Huang, and Y.-C. Lee, "Fabrication of seamless roller mold with 3D micropatterns using inner curved surface photolithography," *Microelectron. Eng.*, vol. 150, pp. 19–25, 2016.
14. Y.-C. Lee, H.-W. Chen, and F.-B. Hsiao, "Fabrication of seamless roller mold for continuous roller imprinting of microlens array films," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 316–323, 2012.
15. S.-W. Tsai, P.-Y. Chen, and Y.-C. Lee, "Fabrication of a seamless roller mold with wavy microstructures using mask-less curved surface beam pen lithography," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 24, no. 4, p. 045022, 2014.
16. S. Yang and Y.-C. Lee, "Ultraviolet beam lithography system for digital fabrication of roller molds," *IEEE ASME Trans. Mechatron.*, vol. 26, no. 1, pp. 226–234, 2021.
17. C. Ji, M. Li, J. Qiu, J. Zhu, and H. Ye, "Fabrication of seamless roller mould with smooth surface microstructures by rotation lithography and reflow process," *Micro Nano Lett.*, vol. 13, no. 7, pp. 1052–1056, 2018.
18. H.-T. Nguyen and Y.-C. Lee, "Step and scanning lithography for patterning seamless microstructures on the inner surface of a hollow roller," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 29, no. 10, p. 105012, 2019.
19. R. Menon, A. Patel, D. Gil, and H. I. Smith, "Maskless lithography," *Mater. Today (Kidlington)*, vol. 8, no. 2, pp. 26–33, 2005.
20. C. Peng, Z. Zhang, J. Zou, and W. Chi, "A high-speed exposure method for digital micromirror device based scanning maskless lithography system," *Optik (Stuttg.)*, vol. 185, pp. 1036–1044, 2019.

作者簡介

陳致豪 / 國立成功大學 機械學系研究所

李永春 / 國立成功大學 機械學系研究所 / 指導老師