

可攜式三維結構雷射雕刻系統開發

Development of Portable Laser Marking System for Three-Dimensional Structuring Applications

曾釋鋒、蕭文澤、鍾健愷、黃國政

Shih-Feng Tseng, Wen-Tse Hsiao, Chien-Kai Chung, Kuo-Cheng Huang

本研究以光纖二極體雷射 (波長 808 nm) 搭配光學／光機元件、雷射振鏡掃描系統、雷射能量輸出控制模組與人機介面，開發出一套應用於三維結構加工的可攜式雷射雕刻系統。雷射光束品質量測結果顯示，雷射光束經光纖準直器後呈現準直的 TEM_{00} 模態，真圓度約 96%，雷射輸出功率隨脈衝重複頻率增加呈線性比例增加。振鏡偏擺角度控制計算結果得知，振鏡每掃描 1 mm 所需電壓值為 0.192 V，最大掃描場範圍為 100 mm × 100 mm。當雷射脈衝重複頻率調整從 1 kHz 至 10 kHz，脈衝寬度分別從 530 μ s 降至 48 μ s。

This study aims to develop a portable laser marking system that consists of a fiber-optics diode laser with a wavelength of 808 nm, optics/opto-mechanical components, a laser scanning module, a laser energy control module, and a human-machine interface for fabricating three-dimensional structures. The measured results of laser beam quality revealed that the laser beam was collimated with TEM_{00} mode through a fiber collimator and the roundness of laser beam was approximately of 96%. Moreover, the laser output power increased proportionally with increasing the pulse repetition rate. The deflective angle of scanner mirrors was adjusted by using 0.192 voltage to obtain a scan distance of 1 mm, and the maximum scanning field was 100 mm × 100 mm. The pulse widths were ranging from 530 μ s to 48 μ s when the laser pulse repetition rates were adjusted from 1 kHz to 10 kHz, respectively.

一、前言

現今商品為了市場導向常設計成亮麗外型、符合人體工學、節省系統空間配置與防偽等功能，其產品設計後之外形傳統以二維結構 (two-dimensional structuring) 加工為主，現今技術已提升至三維結構 (three-dimensional structuring) 或自由曲面外形輪廓加工。因此，三維立體結構製作技術已被廣泛應用於生醫、電子、光電產業與食品加工業。三維立體結構設計製作概念採層層堆疊技術，

可由上而下 (top-down) 或由下而上 (bottom-up) 堆疊形成微型結構，其主軸產品以微型感測器居多。大多數三維微型立體結構製作以半導體微影蝕刻製程為主，其整體製程所需步驟依序為：光罩圖案設計與製作、光阻塗佈、預烘烤、曝光、顯影、烘烤、蝕刻與去光阻等來回反覆製程。對於較複雜三維立體結構製作過程，因光罩開發成本較高、微影蝕刻需較昂貴生產設備成本與蝕刻化學溶劑易造成環境破壞，故採用雷射乾式蝕刻製程技術有助於降低生產成本、簡化生產步驟與消除化學溶劑對環境

傷害。此外，選用雷射不同波長進行各樣式結構加工，具有靈活可多變特性，可根據欲製作微結構材料進行先期評估，再來決定使用雷射源種類與雷射能量大小。圖 1 為自由曲面與三維結構雕刻應用⁽¹⁻⁹⁾，此應用領域涵蓋整個消費性市場，包括在自由曲面不鏽鋼板上進行文字與圖像雕刻、三維立體結構上製作微小電路、滾筒模仁材料上製作微小網點、碳化矽模仁材料製作生醫微陣列微流道結構、微型中空不鏽鋼圓棒製作心導管支架、Zerodur 柱狀棒材上製作銅電極，以及在不規則曲面食品上進行圖案標記等，且應用領域材料不僅侷限於傳統金屬基材。

國內外雷射加工研究對二維或三維結構製程方式包括：(1) 雷射投影式、(2) 陣列型雷射式與 (3) 雷射光束掃描式。光罩雷射投影方法⁽¹⁰⁾ 係將光束擴束與均質化處理後，將高斯能量分布之雷射光束

整型後，再經由光罩圖案投射於材料表面上。使用雷射光罩投影技術需注意：(1) 在大面積投射過程中，光束需先擴束與勻光處理，使雷射能量分布得以更均勻；(2) 投射用光罩材質必須承受雷射能量密度所造成的破壞，且雷射功率透過光罩後減少能量衰減；(3) 設計不同二維圖案，其遮罩處需進行不同設計。Rumsby 等人於 2001 年利用準分子 (excimer) 雷射，對厚膜與薄膜基材以光罩投影方式進行二維畫素電極製作⁽¹¹⁾。在雷射振鏡掃描技術中，Booth 於 2004 年提出以 Nd:YAG 雷射 (波長 1064 nm) 製作銦錫氧化物 (ITO) 薄膜電路於玻璃基板，利用蝴蝶型領結掃描方式 (bow tie scanning, BTS) 搭配平台進給，實現高速加工運用於電漿平面顯示器二維電極製作⁽¹²⁾。Chen 等人於 2009 年利用 CO₂ 雷射 (波長 10.6 μm) 加工系統，在蛋殼二維曲面雕刻流水編碼，蛋殼經雷射雕刻後隨脈衝



圖 1. 雷射三維結構及曲面雕刻應用實例⁽¹⁻⁹⁾。

次數增加 (1 – 10 shots) 熱影響區對蛋殼只深入表層 40% 內，不直接影響雞蛋內層區域，所以雷射標記技術可適用於食品產業⁽¹³⁾。

近年來在三維結構製作中大多數研究採超快雷射為主，如以皮秒 (picoseconds, 10^{-12} s) 與飛秒 (femtosecond, 10^{-15} s) 雷射系統完成微小尺度元件製作。Tan 等人於 2003 年提出以飛秒雷射不同脈衝頻率作用於 PMMA 材料，形成不同聚焦深度，可達到不同深淺的材料加工⁽¹⁴⁾。Liu 等人於 2009 年利用飛秒雷射直寫技術，在光學玻璃基板上加工直徑 $48\ \mu\text{m}$ 與高度 $13.2\ \mu\text{m}$ 球面微透鏡，與傳統雷射直寫技術相比較，此方法有效地達到精密形狀控制，用於加工曲面困難切削材料之三維微結構⁽¹⁵⁾。除此之外，Heyl 等人於 2001 年發展 UV 雷射 (波長 355 nm) 剝蝕機器，應用於硬金屬 (如 WC/Co) 與陶瓷材料三維結構加工，實驗結果顯示其雷射剝蝕表面如同高品質放電加工⁽²⁾。Campanelli 等人於 2007 年使用 30 W 脈衝式 Nd:YVO₄ 雷射 (波長 1064 nm) 雕刻機器，搭配三維雷射銑削技術，應用於鋁鎂合金材料三維複雜結構加工⁽¹⁶⁾。當脈衝重複頻率為 10 kHz、光斑重疊距離為 $20\ \mu\text{m}$ 與掃描次數為 4 次時，可獲得較佳表面粗糙度。Pham 等人於 2007 年利用奈秒脈衝 Nd:YAG 雷射 (波長 1064 nm) 銑削機器，載入欲加工之三維結構 CAD 資料，銑削氧化鋁 (Al₂O₃) 與氮化矽 (Si₃N₄) 陶瓷材料三維微結構⁽¹⁷⁾。2010 年，Samant 與 Dahotre 也使用 Nd:YAG 雷射 (波長 1064 nm) 銑削機器，探討氧化鋁 (Al₂O₃)、氮化矽 (Si₃N₄)、碳

化矽 (SiC) 與氧化鎂 (MgO) 陶瓷材料三維結構移除率⁽¹⁸⁾。實驗結果顯示：材料移除率隨單位時間內溫度上升而增加，材料移除率增加也會造成加工表面粗糙度增加。

本研究提出可攜式三維結構雷射雕刻系統開發，整合連續式與脈衝式二極體雷射 (波長 808 nm)、掃描振鏡系統、聚焦透鏡、光機元件、雷射能量輸出控制模組與人機界面等關鍵元組件，實現迅速、便捷與操作容易之三維結構加工製程技術開發，開創國內產業設備技術自主化之應用，並提升設備開發於國際間競爭力。

二、可攜式雷射加工系統

可攜式雷射加工系統係由雷射源、雷射驅動器、光路系統及控制系統等元組件所組成。本研究採用光纖導光之二極體雷射為光源，其波長為 808 nm，脈衝重複頻率調整範圍從 1 kHz 至 10 kHz，亦可切換調變頻率為連續 (continuous wave, CW) 輸出模式。本研究設計之可攜式雷射加工系統方塊組成架構如圖 2 所示，以下將分別介紹系統各主要單元。

1. 光纖導引雷射模組

(1) 光纖導引雷射源

具紅光導引之光纖二極體雷射源 (波長 808 nm) 其平均輸出功率為 5 W，可執行脈衝模式 (pulsed mode) 或連續模式 (continuous mode) 輸出

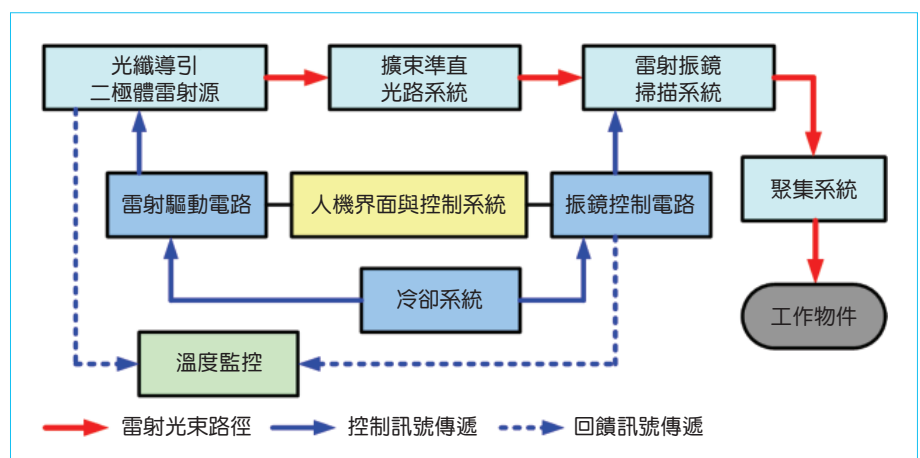


圖 2. 可攜式雷射加工系統組成方塊圖。

雷射光源，光束模態為 TEM_{00} 。雷射導光係採用直徑為 $200\ \mu\text{m}$ 與數值孔徑 (NA) 為 0.22 光纖。系統冷卻採用強制對流氣冷式架構，針對雷射源本體與驅動電路進行冷卻。

(2) 光纖導引雷射源驅動電路

光纖導引雷射源驅動電路如圖 3 所示，驅動電路可針對二極體雷射源進行開／關控制，如圖 3(a) 所示，施以一數位訊號，5 V 激發雷射光源，0 V 關閉雷射光源。雷射能量調變部分係採用外接式可變電阻調整其能量輸出，如圖 3(b) 所示，採順時針旋轉則能量變大，逆時針旋轉則能量相對變小。此外，雷射頻率調變可藉由所設計的函數產生器 (function generator) 電路，輸出脈衝 TTL (transistor-transistor logic) 訊號，調變雷射源輸出脈衝重複頻率從 1 kHz 至 10 kHz。在導引紅光控制部分，係採用數位訊號控制光源輸出，可與二極體雷射源共電路之模式同時打開或關閉導引紅光。

2. 光路系統

可攜式雷射加工系統之雷射光由光纖輸出後，經擴束準直元件 (expander and collimate component)、光欄、掃描系統與聚焦鏡頭，雷射光束聚焦至加工平面。以下針對光路系統各元組件進行介紹。

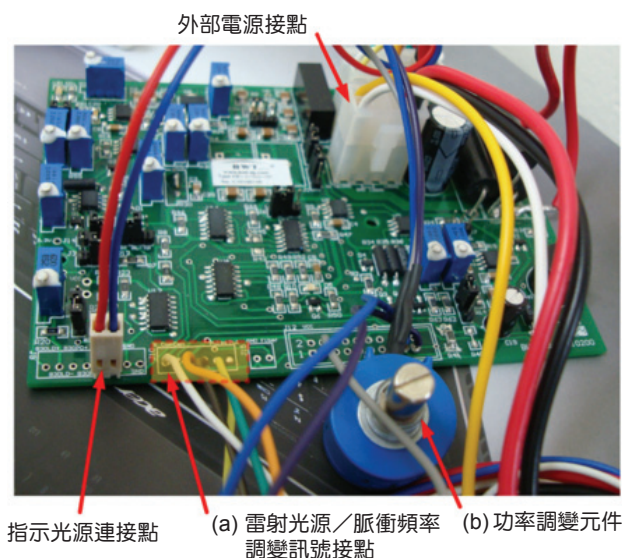


圖 3. 光纖導引雷射源驅動電路。

(1) 擴束準直元件

由於光纖導引雷射所發出的光束具有較大的擴散角度，使光學元件擺設之相對距離無法拉長。有鑑於此，光纖雷射導引光束需先經由擴束與準直元件後，將光束發散角度縮小。採用擴束準直元件之功用說明如下。

(a) 欲得到較小聚焦光斑直徑

根據繞射極限所推估的理想光斑，假設雷射光波長為 λ ，高斯光束擴束後的光束半徑為 w (TEM_{00} 模態)，聚焦透鏡之焦距為 f ，經聚焦透鏡之光斑直徑為 d ，其方程式如式 (1)⁽¹⁹⁾。

$$d = 1.22 \left(\frac{\lambda f M^2}{nw} \right) \quad (1)$$

其中， n 為介質折射率， M^2 為光束品質係數。由此可見經擴束後光束半徑 w 愈大，聚焦後光斑直徑愈小。

(b) 減少雷射光束擴散角

準直後雷射光束擴散角計算可藉由方程式 (2) 進行估算。

$$\theta'' = \frac{\theta_0}{T \sqrt{1 + \left(\frac{L\lambda}{\pi\omega_0} \right)^2}} \quad (2)$$

其中， θ_0 為擴束前的雷射擴散角、 θ'' 為準直後的擴散角、 T 為擴束倍率、 L 為擴束鏡與準直鏡間距、 λ 為雷射光波長、 ω_0 為擴束前的高斯光束束腰。由此可見雷射光經擴束準直後，擴散角較小，其縮小幅度與擴束倍率成正比。

(c) 減少雷射光束能量對光學元件損害

雷射共振腔體所激發的雷射光束能量密度極高，雖然現今光學元件鍍膜品質已可耐極高瞬間功率密度，但為了保持光學元件壽命及其效率，通常會於光路系統中先行擴束，藉以減少雷射光束照射於鏡片上單位面積的能量。

(2) 掃描系統 (Scanning System)

掃描系統主要由兩個可控制迴轉機構及振鏡組成，控制 X 軸向與 Y 軸向振鏡偏擺。振鏡伺服系統轉動力矩計算如方程式 (3)⁽²⁰⁾：

$$T = BLIND - 2\pi 10^{-7} CLN^2 I^2 \left(\frac{D}{g} \right) \quad (3)$$

其中， T 為轉矩大小 (N·m)、 B 為永久磁鐵於空氣間隙中產生的磁感強度、 L 為轉子長度(m)、 D 為轉子直徑 (m)、 g 為空氣間隙 (gap)、 N 為線圈匝數、 I 為線圈電流 (A)、 C 為轉子最大轉角與 α 角之比。由於掃描系統之非線性項 (如方程式剪號右側) 遠小於線性項 (方程式剪號左側)，故可將方程式 (3) 簡化，可得方程式 (4)。

$$T = BLIND \quad (4)$$

由於 T 為一固定常數，則振鏡系統轉矩係數可表示成方程式 (5)。

$$T = K_T I \quad (5)$$

故振鏡系統轉動力矩與流經線圈的電流成正比。則掃描振鏡的轉矩平衡如方程式 (6)。

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} + g\theta \quad (6)$$

其中， T 為振鏡系統線圈電流產生的電磁轉矩、 J 為轉子軸上的反射鏡片相對於轉軸的轉動慣量 ($g \cdot cm^2$)、 θ 為轉子偏擺角度、 $d\theta/dt$ 為轉子角速度、 $d^2\theta/dt^2$ 為轉子角加速度、 f 為振鏡本體與負載折合黏性摩擦係數、 g 為扭力棒彈性系統，則電樞平衡方程式如方程式 (7)。

$$E_i = RI + L \frac{dI}{dt} + E_b \quad (7)$$

$$E_b = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (8)$$

其中， R 為電樞電阻、 L 為電樞電感、 K_b 為振鏡系統反電動勢係數。將方程式 (6)、(7)、(8) 聯立求解，可得到 θ 與 E_i 間的關係，如方程式 (9)。

$$JL \frac{d^3\theta}{dt^3} + (JR + FL) \frac{d^2\theta}{dt^2} + (FR + GL + K_T K_b) \frac{d\theta}{dt} + gR\theta = K_T E_i \quad (9)$$

將方程式 (9) 取拉氏轉換可得方程式 (10)：

$$G = \frac{\theta(s)}{E_i(s)} = \frac{\frac{K_T}{R}}{(LS + R)(JS^2 + fS + g)K_T K_b S} \quad (10)$$

$$K = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (11)$$

方程式 (11) 為振鏡伺服控制系統二階轉移函數方程，可利用此方程式進行系統響應模擬，藉以調整系統比例 (P)、積分 (I)、微分 (D) 參數。本研究係採以調整正負電壓模式控制 XY 軸振鏡偏擺角度與位置。

3. 控制系統

本系統採開迴路系統架構，針對振鏡系統進行控制，控制器的組成如圖 4 所示。並採用 C 語言進行人機界面設計與開發，藉由圖控界面控制雷射

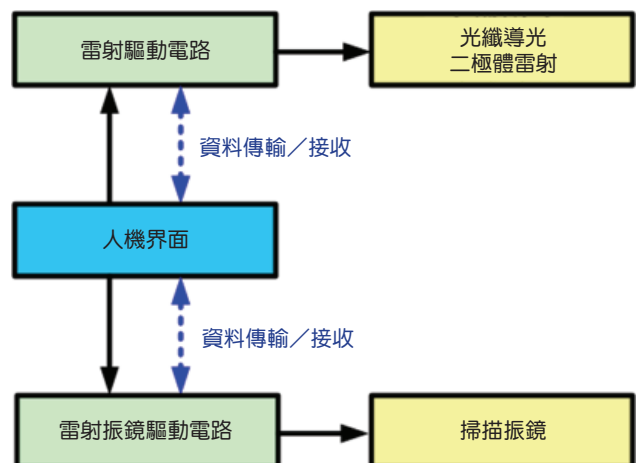


圖 4. 控制系統迴路架構。

光束脈衝出光、調整雷射脈衝作用時間與控制掃描振鏡系統偏擺位置。

三、可攜式雷射加工系統組裝與測試

1. 光纖導引雷射輸出功率測試

雷射平均輸出功率為評價雷射系統能否移除材料的主要評估項目之一。本研究採用美國 Thorlabs 公司所生產的功率計 (powermeter, 型號為 PM100D) 與功率探測頭 (thermal detector, 型號為 S322C) 量測二極體雷射平均輸出功率, 藉由調變不同電阻值, 改變不同驅動電壓與驅動電流, 獲得不同平均功率對應不同驅動電流與驅動電壓曲線, 如圖 5 所示。當驅動電流達到 4 安培 (A) 時, 可獲得最高雷射輸出功率約 5 W, 且輸出功率與驅動電壓呈線性比例增加。圖 6 為不同脈衝操作頻率下之雷射平均功率曲線。經由功率計量測結果可知, 由於單位時間內的能量累積, 使得雷射平均輸出功率隨著脈衝操作頻率增加而呈線性比例增加。

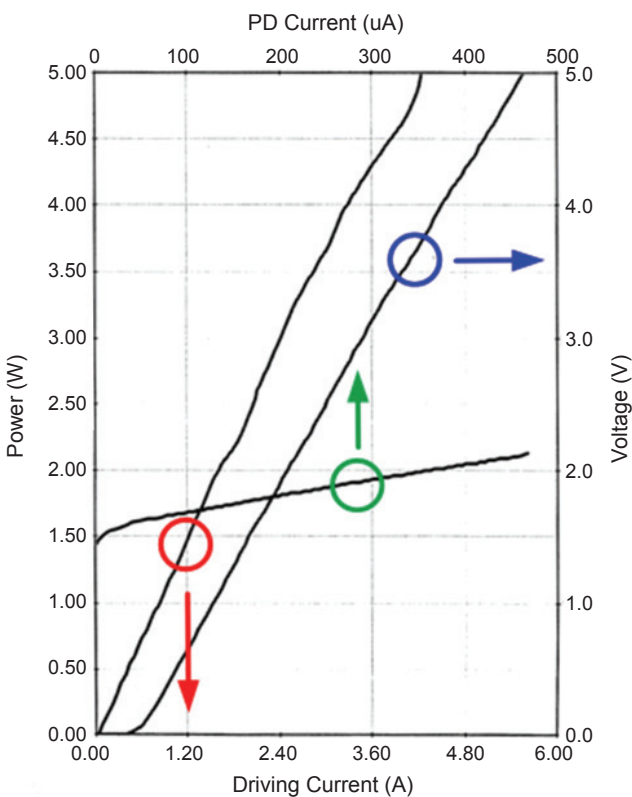


圖 5. 不同驅動電壓與電流相對於雷射輸出功率關係圖。

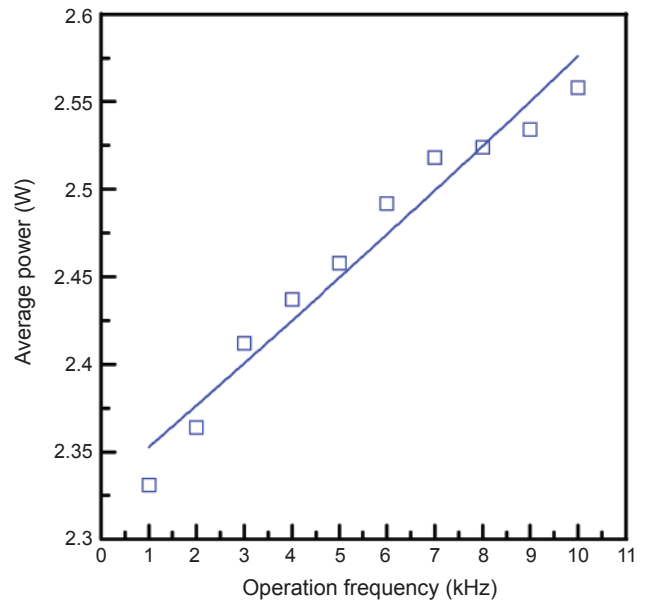


圖 6. 不同脈衝操作頻率下之雷射平均功率曲線。

2. 雷射光束品質量測

雷射光束模態可分為縱模與橫模兩種, 縱模為雷射輸出光束沿傳播水平方向的能量分布, 橫模則為雷射輸出光束在沿傳播垂直方向的能量分布。通常以 TEM_{mn} 表示之, 其中 m 表示 x 方向的節點數, n 表示 y 方向的節點數。本研究係採用美國 Thorlabs 公司生產 BC106-VIS 系列 CCD 相機式光束品質分析儀 (laser beam profiler) 量測雷射光束品質, 此儀器量測光束直徑可從 $30 \mu\text{m}$ 至 6.6 mm , 量測光譜範圍 350 nm 至 1100 nm 。圖 7 為雷射操作頻率在 2 kHz 的實際光束品質量測結果, 由圖 7 量測結果獲得光纖導引二極體雷射源經過光纖準直器 (焦長 10.99 mm 與發散角 0.022 度) 後, 將原先光束進行準直輸出, 其有效光束直徑約 4.3 mm , 光束型態為 TEM_{00} 模, 光束真圓度約為 96% 。

3. 振鏡偏擺角度與實際投影位置測試

圖 8 為振鏡掃描場幾何位置關係圖。定義掃描振鏡在驅動電壓為 0 伏特 (V) 時, XY 軸振鏡兩軸之交錯位置為原點 (0, 0)。觀察掃描振鏡前視圖, 當 X 軸振鏡掃描方向向右邊偏擺定義為正, 向左邊偏擺定義為負。此外, 欲進行大面積掃描需考慮到聚焦透鏡與工作物件的距離, 最後再決定掃描區域的電壓選擇與計算整體掃描所需時間。為考量操

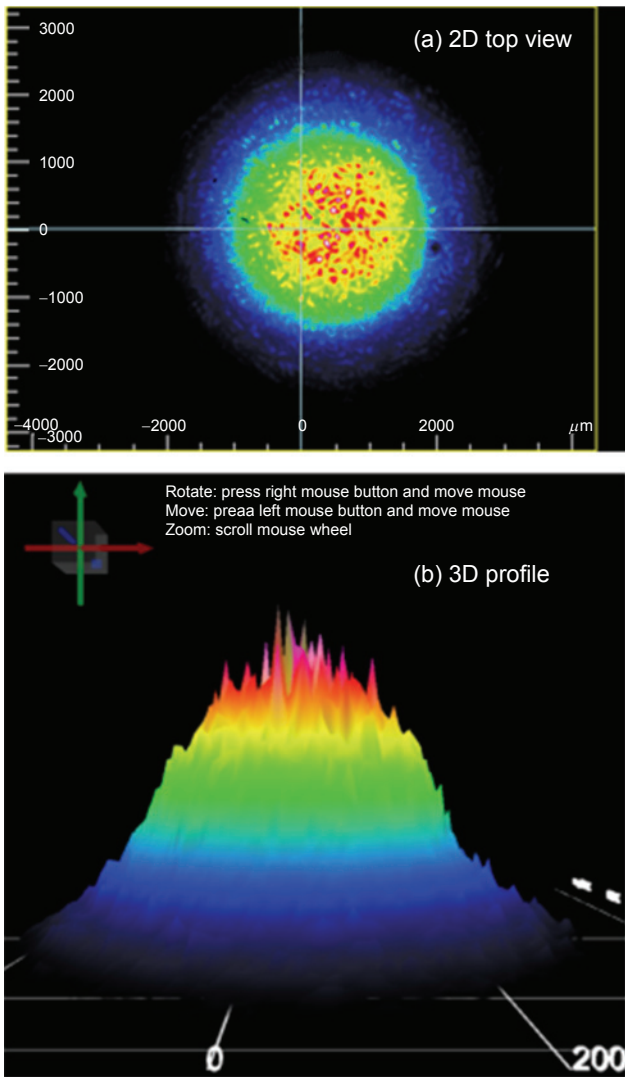


圖 7. 雷射光束品質量測結果，(a) 二維上視圖與 (b) 三維立體圖。

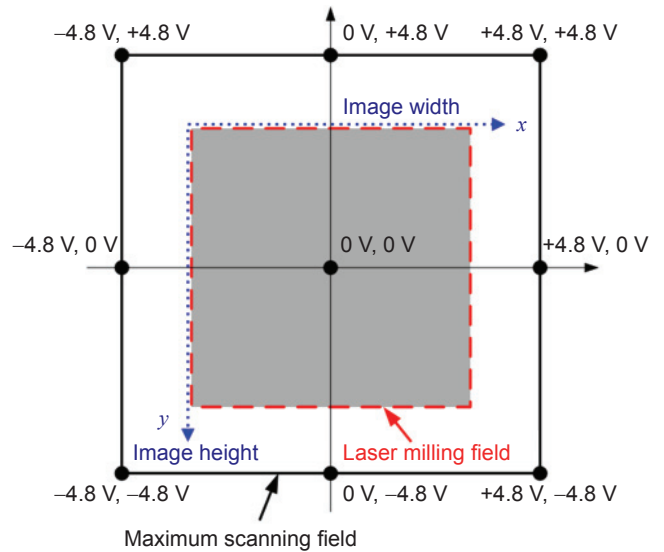


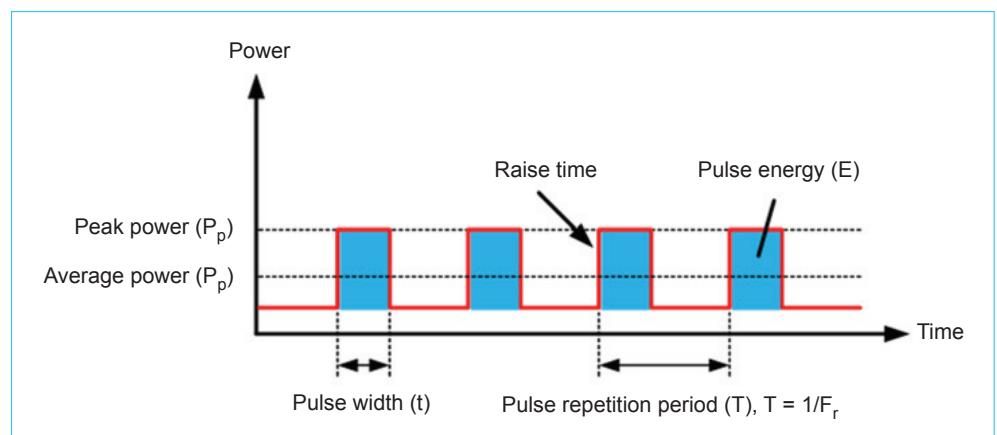
圖 8. 振鏡掃描場幾何位置對應驅動電壓關係圖。

作安全且保護振鏡掃描系統，其操作電壓值設定為系統滿載的 96%，為 $\pm 4.8\text{V}$ 。經實驗測試結果得知，最大掃描範圍為 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ，換算得知振鏡每掃描 1 mm ，所需電壓值為 0.192 V 。

4. 光纖導引雷射脈寬量測

雷射功率調變是以改變雷射脈衝比值 (duty cycle, $t/T = P_a/P_p$)，雷射脈衝比值為脈衝寬度輸出時間與脈衝週期百分比值，如圖 9 所示。圖中 t 為脈衝寬度、 T 為脈衝週期 (為脈衝重複頻率 F_r 的倒數)、 P_a 為平均輸出功率、 P_p 為峰值功率與 E 為脈衝能量。例如：當雷射脈衝寬度為 2 ms ，脈衝

圖 9. 脈衝雷射輸出能量與頻率關係示意圖。



重複頻率為 250 Hz 時，雷射作用時間為 4 ms，因此雷射脈衝比值為 50%。在脈衝寬度實際量測上，本研究採用光偵測器 (photodetector) 搭配示波器量測二極體雷射源脈衝寬度。圖 10 為二極體雷射源於不同操作頻率下之脈衝寬度量測值。由圖中可知，當雷射脈衝重複頻率調整從 1 kHz 至 10 kHz，脈衝寬度分別從 530 μs 降至 48 μs 。由圖 9 單一脈衝作用時間可知，當雷射源操作頻率越快時，其脈衝寬度之半高寬值 (FWHM) 隨著脈衝重複頻率增加而縮短。

5. 可攜式雷射系統組裝與三維結構銑削測試

圖 11 為可攜式雷射雕刻系統實體圖與人機介面操作視窗。其系統整合光纖二極體雷射 (波長 808 nm)、光學/光機元件、雷射振鏡掃描系統與雷射能量輸出控制模組於一可攜裝置內，系統外形尺寸約長 30 公分、寬 33 公分與高 45 公分。且其系統外形以鋁擠型材料設計支架，搭配壓克力板材為雷射防護窗鏡，使系統整體重量大幅降低約至 5 公斤。透過人機介面控制光纖二極體雷射 ON/OFF、雷射功率 (0–5 W) 與脈衝作用時間，載入預先設計完成之 CAD 圖像或 CAM 程式，操控雷射輸出經由光纖擴束器、掃描振鏡與 $f-\theta$ 聚焦鏡

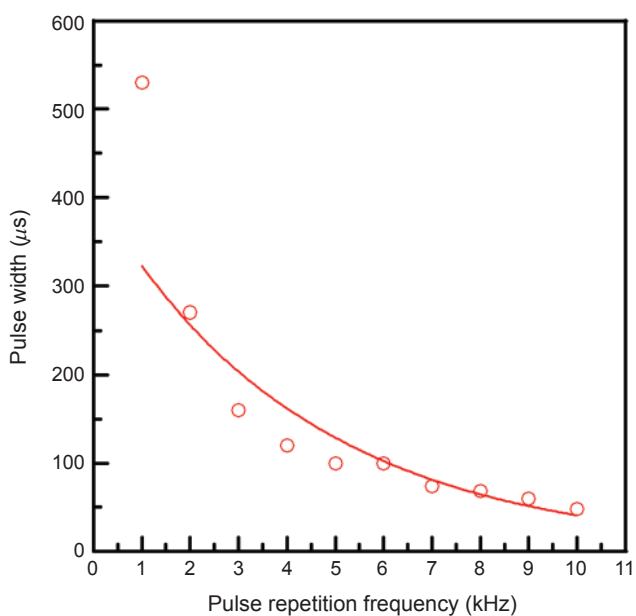


圖 10. 二極體雷射源於不同操作頻率下之脈衝寬度量測值。

(焦長與掃描範圍分別為 158 mm 與 100 mm × 100 mm) 後，聚焦光斑 (直徑約 80 μm) 依圖像之像素 (pixel) 或 CAM 程式資料快速掃描雕刻於試片上。

圖 12 為利用 Keyence 非接觸式數位三維共焦顯微鏡之拼接技術，量測玻璃碳 (glassy carbon) 材料雷射內凹與內凸方錐三維銑削後之立體圖。雷射加工能量皆設定在 5 W，雷射脈衝作用時間為 48 μs 。圖 12(a) 中，內凹方錐邊長由內而外依序設計為 250 μm 、500 μm 、1000 μm 、1500 μm 與 2000 μm ，經雷射銑削次數由內而外依序設計為 10、8、6、4 與 2 次；量測結果顯示內凹方錐結構可明顯觀察出立體層次輪廓，每層深度差平均約為 8

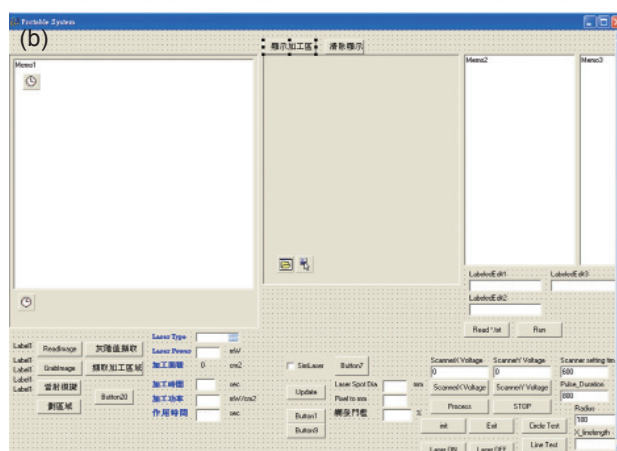
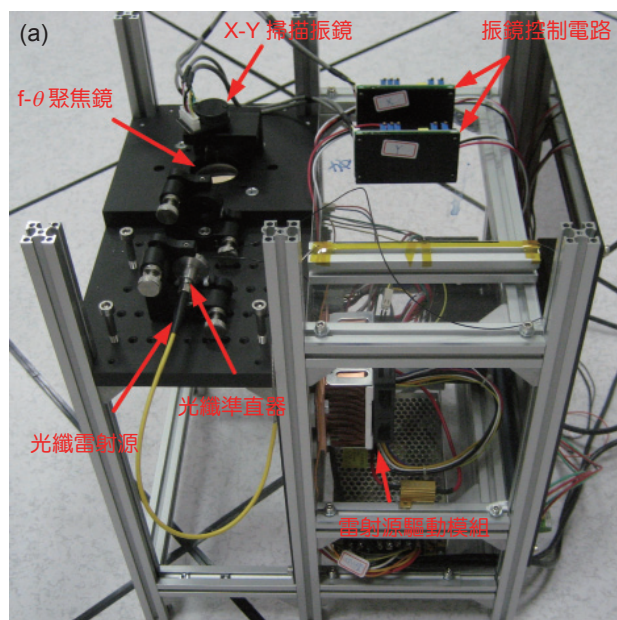


圖 11. (a) 可攜式雷射雕刻系統實體圖與 (b) 人機介面操作視窗。

μm 左右，但最內層因加工區域小且銑削次數多，造成雷射銑削熱能累積較多，此斷面深度差約為 $20\ \mu\text{m}$ 。圖 12(b) 中，內凸方錐邊長由內而外依序設計為 $500\ \mu\text{m}$ 、 $1000\ \mu\text{m}$ 、 $1500\ \mu\text{m}$ 與 $2000\ \mu\text{m}$ ，經雷射銑削次數由內而外依序設計為 4、8 與 12 次。量測結果顯示內凸方錐結構因銑削次數更多，更可明顯觀察三維立體層次輪廓，每層深度差平均約為 $10\ \mu\text{m}$ 左右；但最外層因加工區域銑削次數較多，容易累積較多熱能，因此斷面深度差約為 $50\ \mu\text{m}$ ，玻璃碳材料表面經雷射銑削後也顯得較為粗糙。

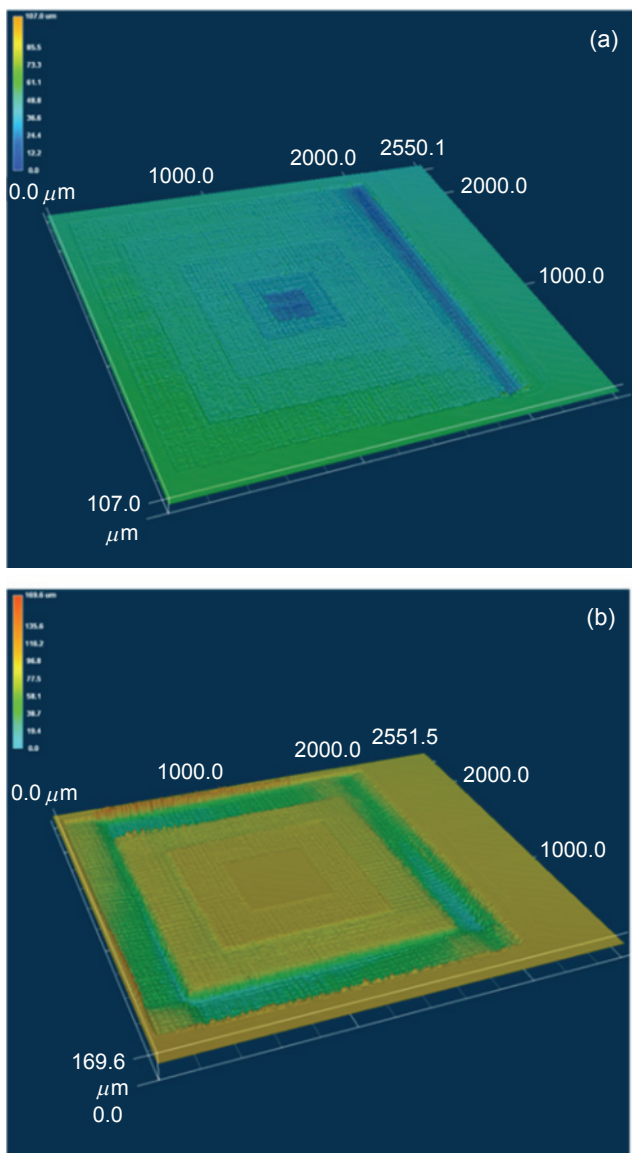


圖 12. 玻璃碳 (glassy carbon) 材料 (a) 內凹與 (b) 內凸方錐三維銑削量測圖。

四、結論

本研究完成可攜式三維結構雷射微加工系統研發，並自行開發系統控制、人機介面與系統參數量測方法。研究中發現雷射平均輸出功率隨著頻率增加呈線性比例增加，雷射光束品質可藉由光纖準直器，使光束品質保持穩定真圓度，其雷射脈衝寬度量測結果為微秒 (μs) 等級。隨著三維立體結構的市場需求成長，使得國內電子、光電、生醫與食品工業供應業者持續增加。因此，立體結構製作技術將逐漸被廣泛應用於各類產業中，如薄膜太陽能電池製程之雷射絕緣、LED 晶圓劃線製程與觸控面板製程中透明導電薄膜電極圖案成型等二維加工，亦可應用於工業產品之三維防偽標記及三維曲面農產品之商標與日期印製等。此技術與產品開發呼應政府近年來大力推行產業自主化設備技術開發，將有極大正面推廣效益。

誌謝

本研究承蒙國科會產學計畫 (編號 NSC-100-2622-E-492-002-CC3) 與毓翔企業有限公司經費補助支持，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. J. Diaci, D. Bračun, A. Gorkič, and J. Močina, *Opt. Laser Eng.*, **49**, 195 (2011).
2. P. Heyl, T. Olschewski, and R. W. Wijnaendts, *Microelectron. Eng.*, **57-58**, 775 (2001).
3. P.-F. Chauvy, P. Hoffmann, and D. Landolt, *Appl. Surf. Sci.*, **256**, 165 (2010).
4. B. Wojakowski, U. Klug, J. Dusing, and R. Kling, *Physics Procedia*, **5**, 301 (2010).
5. A. Schubert, S. Gross, J. Edelmann, and B. Schulz, *Physics Procedia*, **5**, 261 (2010).
6. C. Siewert and F. Löffler, *Surf. Coat. Technol.*, **200**, 1061 (2005).
7. K. Sugioka, B. Gu, and A. Holmes, *MRS Bull.*, **32**, 47 (2007).
8. End of the sticky label: Lasers to etch sell-by dates and price onto fruit (<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1321588/End-sticky-label-Lasers-etich-sell-dates-price-fruit.html>)
9. A. Kaldos, H. J. Pieper, E. Wolf, and M. Kraue, *J. Mater. Process. Technol.*, **155-156**, 1815 (2004).
10. S. Venkat and C. Dunskey, *Proceeding of SPIE*, **6106**, 610602 (2006).

11. P. Rumsby, E. Harvey, D. Thomas, and N. Rizvi, *Proceeding of SPIE*, **3184**, 176 (1997).
12. H. J. Booth, *Thin Solid Films*, **453**, 450 (2004).
13. M. F. Chen, W. T. Hsiao, W. L. Huang, C. W. Hu, and Y. P. Chen, *J. Mater. Process. Technol.*, **209**, 737 (2009).
14. B. Tan, K. Venkatkrishnan, N. R. Sivakumar, and G. K. Gan, *Opt. Laser Technol.*, **35**, 199 (2003).
15. H. Liu, F. Chen, X. Wang, Q. Yang, D. Zhang, J. Si, and X. Hou, *Opt. Commun.*, **282**, 4119 (2009).
16. S. L. Campanelli, A. D. Ludovico, C. Bonserio, P. Cavalluzzi, and M. Cinquepalmi, *J. Mater. Process. Technol.*, **191**, 220 (2007).
17. D. T. Pham, S. S. Dimov, and P. V. Petkov, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **47**, 618 (2007).
18. A. N. Samant and N. B. Dahotre, *J. Manuf. Processes*, **12**, 1 (2010).
19. J. C. Ion, *Laser Processing of Engineering Materials*, 1st ed. Elsevier, Great Britain, 104 (2005).
20. 葉喬, 高速振鏡理論研究及實踐, 華中科技大學碩士論文 (2004).



曾釋鋒先生為國立交通大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Shih-Feng Tseng received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蕭文澤先生為彰化師範大學機電工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Wen-Tse Hsiao received his Ph.D. in mechatronics engineering from National Changhua University of Education. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



鍾健愷先生為彰化師範大學機電工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究助理。

Chien-Kai Chung received his M.S. in mechatronics engineering from National Changhua University of Education. He is currently a researcher assistant at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃國政先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼任組長。

Kuo-Cheng Huang received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.