影像處理應用於紙張雷射雕刻特性之研究

指導教授：葉文俊
研究學生：嚴凱傑、呂沅澍、陳宥勳、汪碧茹、陳文玄
關 鍵 詞：雷射雕刻、影像處理、色階分佈圖

摘要

雷射以加工精準特性被廣泛用於工業，隨著周邊軟硬體設備的迅速進步及連結電腦系統後，操作難度大幅降低，便利性也隨之提高市面上的雷射雕刻產品以密集板、木頭、壓克力為主，紙張成為新興產品，雷射雕刻應用於紙張的產品除了常見的雕刻外，另有一種特殊的產品稱為「紙張透雕」，它是藉由雷射光點在紙上蝕出細密的網洞，藉此模仿印刷的半色調概念，將圖片的各細節真實呈現於紙張。本研究目的為整理適合臺灣地區的雷射雕刻產業影像處理應用於紙張之雷射雕刻參數組合，先以 Photoshop 進行影像處理並針對四種美術社易取得的四種紙張（240 磅巴比松水彩紙、230 磅象牙卡、150 磅道林紙、190 磅雪銅紙）進行雕刻，進一步將雕刻樣本進行雕刻品質測量檢測。本研究針對影像處理在雷射雕刻圖像上的影響，以影像對比度、解析度與抖點階數組合作為主要探討參數，除了單一因子的觀察，也有三者的交互作用分析，並比對各樣品的 3D 立體色階分佈圖與原始圖檔的 3D 立體色階分佈圖之差異，研究結果發現，雷射雕刻將影像複製於紙張上，無法完整複製原圖的階調表現，但是藉由加工前適當的影像處理與加工時的參數設定，可以更加接近的複製原圖階調，雷射雕刻將影像複製於紙張上，無法完整複製原圖的階調表現，但是藉由加工前適當的影像處理與加工時的參數設定，可以更加接近的複製原圖階調。

壹、緒論

一、研究背景和動機

雷射雕刻應用於紙張的產品除了常見的雕刻外，另有一種特殊的產品稱為「紙張透雕」，「紙透雕」在雕刻過程中同樣會因輸入端、輸出端、影像階調 ... 等因素影響最終成像品質。（陳書宇，民 99）

本研究選擇調整「亮度對比」、「解析度」及「色階」作為操作型因子，透過改變影像品質相關的變數使雕刻成品的品質近似原品，若能將影響因子加以控制，在往後雕刻過程中能夠確保複製前後的影像一致且具有較好的匹配性影像品質。（魏裕昌、唐大崙、徐明景、許維，民 93）

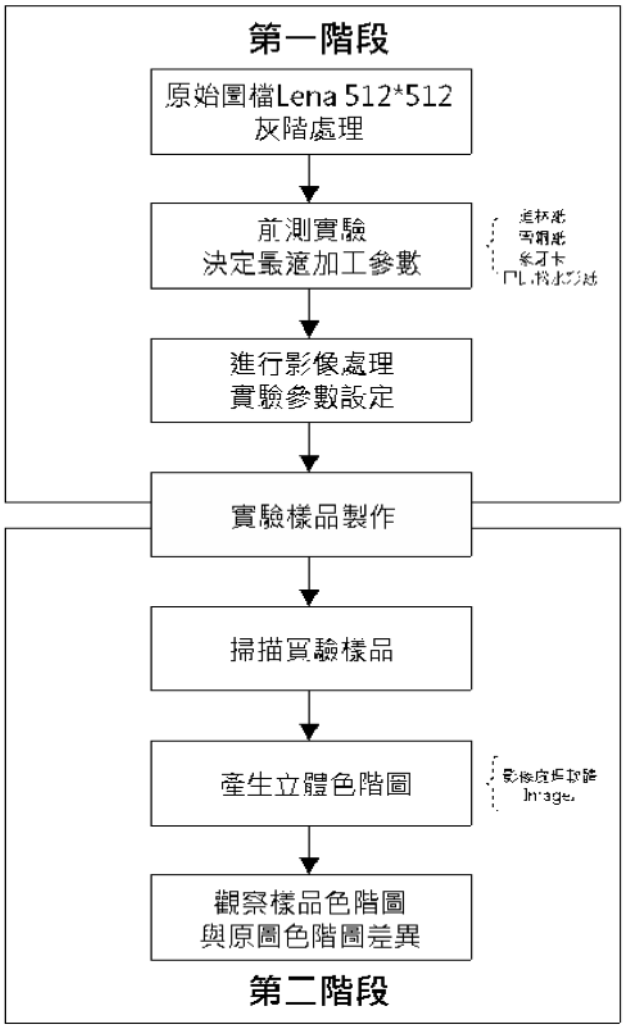
二、研究問題與目的

1.四種紙材於固定速度、解析度、對比度及抖點模式 (dithering) 之下，探討功率對雕刻成品是否有顯著影響？
2.四種紙材在固定功率及速度下，對比度或解析度或抖點模式 (dithering) 或其交互作用對雕刻成品是否有顯著影響，若有相關，其關聯性為何？
3.探討此四種不同紙張的雕刻成品表現差異
4.探討如何透過調整三項參數〔對比度、解析度、抖點模式 (dithering)〕使雕刻成品使原圖的影像數值接近一致？

三、研究架構

本研究之研究架構圖如下：

圖 1-1 研究架構圖



四、研究假設

本實驗中，假設雕刻完成並掃描成為電子檔的影像數值為 y_2，輸入的原圖的影像數值為 y_1，其假設對比度為 x_1、解析度 (dpi) 為 x_2、色階為 x_3，此次實驗欲使雕刻影像成品掃描後的影像數值與原圖一致，假設式為：

$H_0: \Delta y=y_2-y_1=0$

$H_a: \Delta y=y_2-y_1 \neq 0$

其中

$y=\alpha+\beta_1 x_1+\beta_2 x_2+\beta_3 x_3+\beta_4 x_1 x_2+\beta_5 x_1 x_3+\beta_6 x_2 x_3+\beta_7 x_1 x_2 x_3$

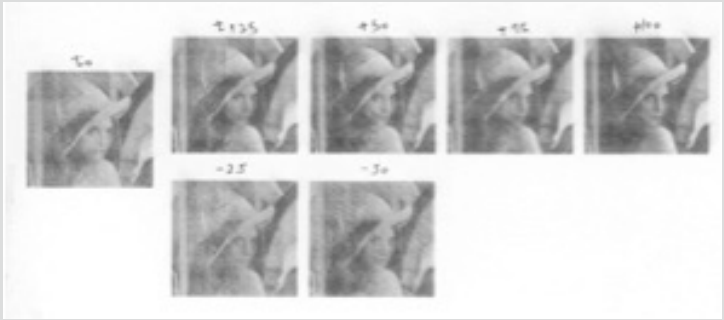
五、研究範圍與限制

1.本實驗實驗設備為 GCC LaserPro Spirit 雷射切割雕刻機
2.本實驗使用的影像處理軟體為 Adobe Photoshop CS6
3.本實驗使用的影像分析軟體為 Image J Mac OS 版
4.本研究使用的影像為標準測試圖片 Lena 512x512，其他圖樣影響不在此研究討論內。
5.本研究使用的掃描機器為 MICROTEK LS-3700，其掃描設定皆固定為廠商一般設定之參數，其他特殊參數造成研究結果影響，不在討論範圍之內。
6.本研究雕刻過程中，成像大小為 45x45 毫米
7.印刷濕度及相對溫度並未控制，完全依照日常使用之設定進行雕刻，其對研究之結果的影響不列入討論。
8.本研究使用紙張皆為同時購入，紙張於製成時產生的差異及原料對研究成果的影響不在本研究之討論內。
9.本研究實驗因經費及人力限制，僅針對巴比松水彩紙、象牙卡、道林紙、雪銅紙進行研究。
10.本研究實驗使用的紙材於購入後皆無做任何後加工之處理。

六、 名詞解釋與定義

1.雷射雕刻參數 - 功率：單位為瓦特（W）表示能量轉換及使用的速率，以單位時間的能量大小來表示，此研究為雷射管放出的能量。
2.雷射雕刻參數 - 速度：表示物體在一段時間內的位移與時間之比。此研究以公厘（mm）/ 秒（S）為單位，表示聚焦鏡之移動速度。
3.CO2 雷射雕刻 (機)：本次研究使用之機器為 GCC LaserPro Spirit GLS ，其雷射源為 20W & 60W 9.3-μm 密封 CO2 雷射，採用氣冷式冷卻，操作溫度：15° -30° C (60° -86° F)。
4.影像處理：本研究使用軟體為 Adobe Photoshop。
5.對比度：圖像的對比度是圖像中最暗與最亮點之間的比值。
6.解析度：單位長度上像素的數目。
7.抖點模式 (dithering)：只使用黑與白表現圖片，有 2*2、3*3、4*4、5*5、6*6、7*7 及 8*8 共七種表現模式。
8.雕刻成像：經雷射雕刻機雕刻後並掃描的成品，使用圖像為 Lena 512，如圖 1-2

圖 1-2 雕刻成像示意圖



9.立體色階分佈圖：立體色階分佈圖是將圖片的像素以 XY 座標表示，Z 座標為 0 - 255 的 8bit 色階分佈，從色階分佈圖可以觀察到掃描圖片的階調重現、整體色調偏移等等，本研究的立體色階分佈圖是將樣品掃描後，使用 ImageJ 影像處理軟體產生。

貳、文獻探討

一、雷射加工

（一）雷射加工原理

雷射加工為一種融化及汽化的加工過程。當雷射光照射在工作表面時，光的輻射會以反射、吸收與穿透方式和材料作用，材料表面會因高溫而被氧化或是形成熔融狀態，不同的材料其物理特性也不同，會因熔點、汽化熱及沸點，加工的溫度也會不同。

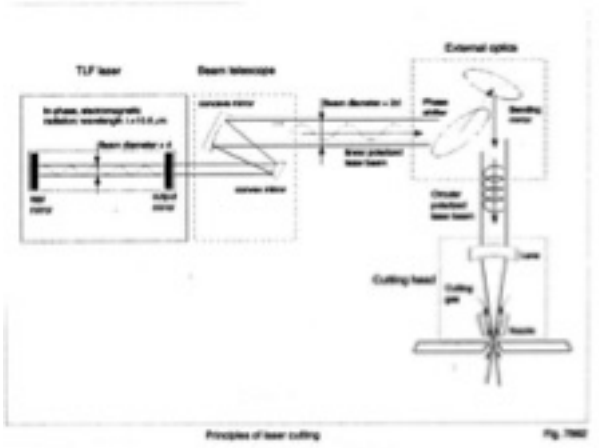
在足夠能量密度的雷射光照射下，材料表面才能達到熔化或汽化溫度，使材料汽化蒸發或熔融並且移除材料。加工原理又分為脈衝式和連續式。脈衝式在一個脈衝內其峰值功率則非常高，但其平均功率則與商用雷射相當。

脈衝式雷射加工先以一個脈衝讓被印物表面吸收，並且產生熔化區和汽化區；下一波時再使內層材料的汽化溫度更高，並且以熔融的形式被移除。連續式在外加調變機制下，出的功率數值固定、不隨時間改變，對於商用雷射其功率可從毫瓦至 25 千瓦，甚至在軍用雷射上，其功率可達百萬瓦特以上。

（二）雷射加工特色

1.適用於細微加工、切斷、熔接、表面處理。
2.可加工金屬、非金屬、複合材料等材料。
3.多樣性加工，藉由光路變換或是光束分割，可同時進行不同場所的加工 (可在大氣中或是真空中加工)

圖 2-1 雷射雕刻機系統流程圖



（三）雷雕機器操作參數

1. 速度 (Speed)：此參數控制雷射切割或雕刻的速度，其設定範圍從 0.1　至 100%，但只有在處理直線移動距離時，速度才會達到 100%，換句話說，在處理曲線時，機器會自動減速，因此速度的 % 僅能呈現最大速度但不等於實際上是如此。另外速度會根據作業大小、圖形的複雜性設置處理的時間。

2. 功率 (Power)：此參數控制雷射切割或是雕刻時的雷射脈衝的能量大小，其設定範圍從 0　至 100%，功率越低雕刻的深度越低，反之亦然。

3.PPI (Pulses-Per-Inch)：代表在每英吋中雷射脈衝的的頻率，較高的 PPI 會使切割的邊緣碳化、融化；反之，較低的 PPI 會降低其切割的力量，因此會造成邊緣鋸齒化。

4. 抖點模式 (dithering)：即為將圖片中的像素點以小點重新排列的過程，範圍由 2x2 至 8x8。例如：選擇 2x2 的抖點模式是以 5 種灰階的顏色以半色調的方式排列，若選擇 8x8，則是以 64 種顏色以半色調的方式排列。

5.DPI：在每一英吋中雷射發射的次數，越高的 DPI 將使成品更清晰且割痕較深，反之越低的 DPI 的成品則會較粗劣且割痕較淺。基本設定可選擇 125、250、300、380、500、600、760、1000。

二、紙張

（一）紙張基本性質

1. 尺寸：將紙張的長寬有固定的標準與比例，以供不同產品使用，目前最常見的在國際間是 ISO 所制定的標準，並且將尺寸以編號來代稱例如：A4、B5。

2. 基重：紙的基重及厚度是紙的基本規格，通常基重是指 1 平方米（m2）紙張重量的克數（g）。紙張的基重影響其不透明度、剛度及紙張的一般強度性質。一般印刷用紙的基重為 50-160g/m2, 低於 50g/m2 剛度可能過低，高於 160g/m2，屬於紙板範圍。造成基重變化因素包括：水份、紙漿的濃度與分佈等。

3. 厚度：厚度分為兩種表示方式：thickness 及 caliper，thickness 是指單張所測得的厚度，caliper 是一疊紙張總厚度除以張數所得平均值。

（二）紙張種類

紙張種類繁多，依其用途及品質特性可概分為文化用紙、工業用紙、包裝用紙、資訊用紙及特殊用紙等六大類。文化用紙、 工業用紙、 包裝用紙、家庭用紙、資訊用紙、特殊用紙。

（三）文化（印刷）用紙與美工用紙

本研究採用紙樣分別為 150 磅道林紙、190 磅雪銅紙、230 磅象牙卡與 240 磅巴比松水彩紙，而照紙張種類又分成印刷用紙與美術用紙，因此就上述兩種作為探討。

1. 印刷用紙：主要分為塗佈紙及非塗佈紙兩類，塗佈紙是在基紙塗上塗料 (coating color) 經乾燥、壓光處理，表面平滑光亮，不起毛，紙白，光線反射率高，紙張伸縮性低，適於彩色印刷及加工。依據塗料的厚度可分為原紙 (未塗佈、微塗、輕塗、重塗)，塗佈越重的紙張愈光滑，反之則粗糙。

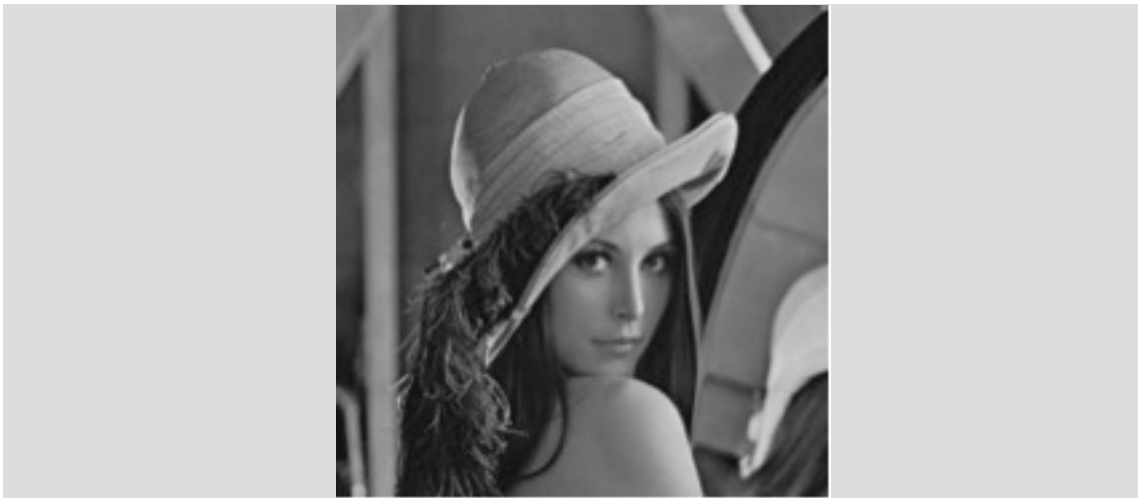
2. 美工用紙：表面多為不規則細緻壓紋，針對不同特性，使印刷品表現多樣化的視覺效果，例如：色荷紙、絲紋紙、星幻紙、牛皮紙、麗綺紙、雲彩紙、雪花紙、草木紙、萊妮紙。

三、影像處理

（一）標準印刷測試圖片

此測試圖片 (如下圖) 是由來思大學的鄧肯霍恩教授團隊所研發並命名為 Lena(也可稱為 Lenna)，實驗時所使用的是 1024X1024 像素的圖檔，Lena 有許多不同的版本，如：24bit、8bit。

圖 2-2Lena 512



（二）對比

對比是影像品質中一個重要的要素，有良好的對比意味著亮度適中、細節清晰…等等因素的配合，在 Weber 定律中對於單一像素對比的定義是 C= Δ L/L，其中Δ L 是此像素和周邊像素的明視度 (Luminance) 差，L 是此像素本身的明視度，透過影像對比的調整，可以使影像的細節或特徵更為突顯，影像對比的修正，是對影像亮度的分佈進行改變，經常使用的對比強化方法有直方圖拓寬演算法 (Histogram Stretching)、直方圖等化 (Histogram Equalizing)(王乃慶 , 2008)

直方圖等化是將原亮度重新均勻等化到新的亮度值，將原來在直方圖中比較窄化的影像，例如：低對比度影像，將其亮度灰階均勻地分散，得到較高對比的影像，將影像中過亮的部分降低亮度，影像中偏暗的部分提高亮度，使得細節更為清晰。

影像對比調整在本實驗中是重要的一環，當在進行雕刻時，影像中的亮部，因為沒有像素的分佈，是沒有被雕刻到的，將最亮的色階壓縮，重新取樣後，亮部有了均勻的像素，會輕微的受到雕刻，而不會直接露出原材料。

（三）數位影像位元深度與灰階

像素是構成點陣圖影像的基本元素，每個像素裡包含著二進位的資訊，稱為位元(bit)，每個位元的內容可以是「0」或是「1」，當每個像素點中只包含一個位元，也就是「0」或「1」的資訊時，所呈現的影像只能有「黑」或「白」，但是當每個像素點可以包含兩位元的資訊時，便能表現出「黑」、「深灰」、「淺灰」、「白」4 種可能的影像組合，這就是所謂影像的「位元深度」。

參、研究方法

本節將描述本實驗所使用之研究方法與實驗步驟，目的為建構一個可觀察影像處理對於雷射雕刻影像的影響之研究架構，內容包含實驗設計、研究變項、實驗流程。

一、實驗設計

本實驗採用真實驗研究法（True Experimental Design），實驗流程分為影像處理與雷射加工兩步驟，首先將實驗影像載入影像處理軟體中，進行對比參數的調整，接下來將圖像進行雷射雕刻參數調整，透過驅動軟體做解析度、抖點的設定操作，最後輸出至紙張材料上，將此流程重複使用在雪銅紙、道林紙、象牙卡及巴比松水彩紙，進而觀察影像處理應用於雷射雕刻在不同材料上的表現，找出影像對比度、雷射雕刻參數設定對於雷射雕刻於紙張上的影像再現有何影響。

二、研究變項

為研究影像處理應用於紙張雷射加工之特性，本研究所採用之標準圖像為 Lena 512x512，並以 Adobe Photoshop CC 做為影像處理工具，進行影像對比調整，以數值 10 為級距進行調整，影像半色調處理則是使用 Spirit GLS 雷射雕刻機之驅動程式，選用擴散誤差法進行影像影像半色調處理。

依變項：

1.實驗樣品與原圖進行比對後所得之 MSE(Mean Square Error) 值

自變項：

1.影像對比度 (Image Contrast)
2.影像解析度 (Image Resolution)
3.影像抖點 (Image Dithering)

三、實驗儀器

（一）、GCC LaserPro Spirit GLS 雷射雕刻機

圖 3-1GCC LaserPro Spirit GLS



本研究使用之雷射雕刻機為星雲電腦股份有限公司製造之 GCC LaserPro Spirit GLS，功率 60W、掃描解析度 1000dpi，雕刻速度固定為 100，功率調整以 10% 為級距調整，測試不同參數可達到的雕刻效果。

（二）、Microtek LS-3700 平台式落地型掃描器

本研究使用 Microtek LS-3700 大尺寸平台式掃描儀，進行實驗樣品的掃描，掃描後的影像與原圖進行比對。

圖 3-2.Microtek LS-370



四、樣本

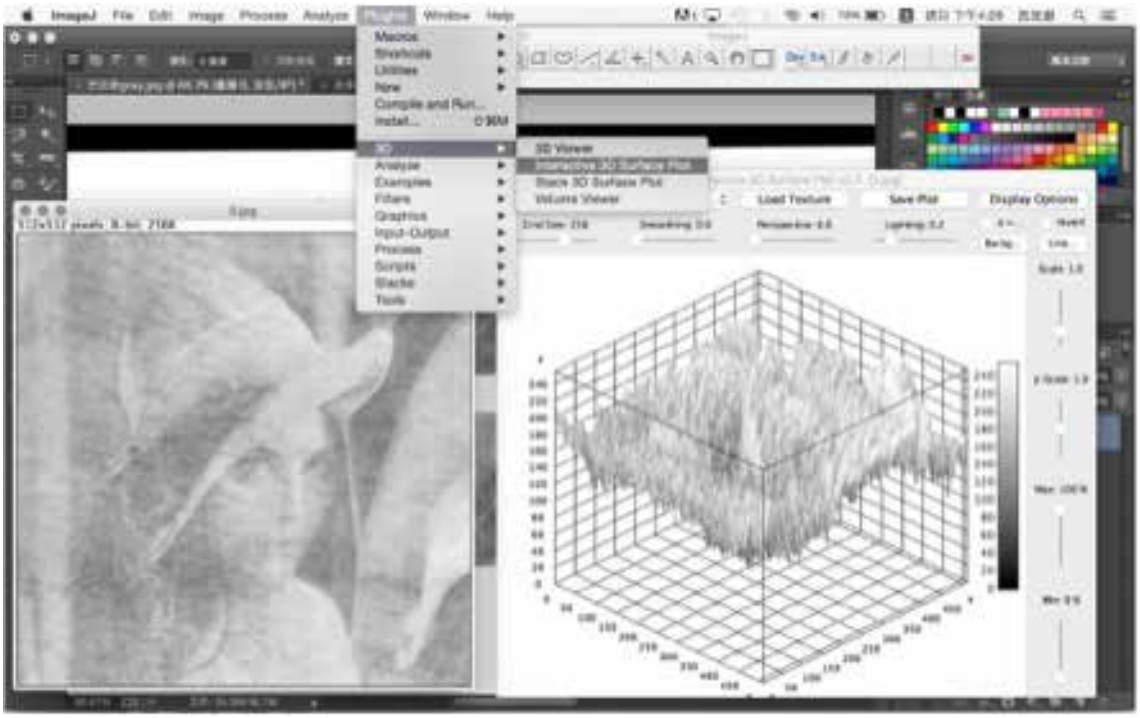
由於本研究時間與資金上的限制，並希望增進實驗的實用性、使用容易取得之材料，所選用的四種紙材皆由美術社購得，本研究所選用之四種紙材為 150 磅道林紙，190 磅雪銅紙，230 磅象牙卡與 240 磅巴比松水彩紙，考量到紙張濕度會對於實驗結果造成影響，所有紙張在進行實驗前存放於 22˚C、相對濕度 65%RH 的環境下至少三天，避免因為紙張濕度造成的紙張變形或是加工適性的變化，如含水量過高難以進行雕刻等。

原圖經過影像處理後，載入至雷射雕刻機驅動程式，進行加工參數之設定，接著對材料進行加工，每次加工中間間隔一分鐘，以避免雷射雕刻機過度使用，造成加工品質不穩定。

五、資料蒐集與分析

所有的實驗樣品完成後，使用 Microtek LS-3700 平台式掃描機，使用 8 bit 灰階掃描進電腦，並使用 ImageJ 生成實驗樣品的立體色階分佈圖，ImageJ 是美國國立衛生研究院 (National Institute of Health, NIH) 開發的圖像軟體，以 Java 為基礎、開放程式碼的免費影像處理分析軟體，支援多種圖像格式，並且可以編輯、分析影像，並輸出成所需的資料，本研究所使用的立體色階分佈圖是將圖片的像素以 XY 座標表示，Z 座標為 0 - 255 的 8bit 色階分佈，從色階分佈圖可以觀察到掃描圖片的階調重現、整體色調偏移等等。

圖 3-3. 色彩資訊分析操作圖



六、實驗流程

本研究的主要分為雷射加工與 MSE 值測量兩部分，研究流程圖如下。

圖 3-4. 第一階段研究流程圖

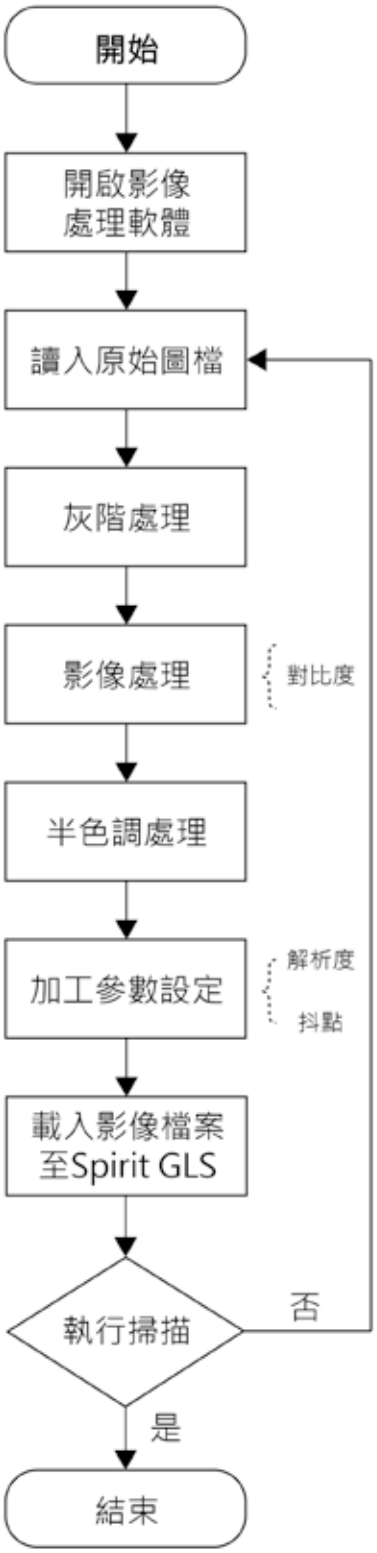
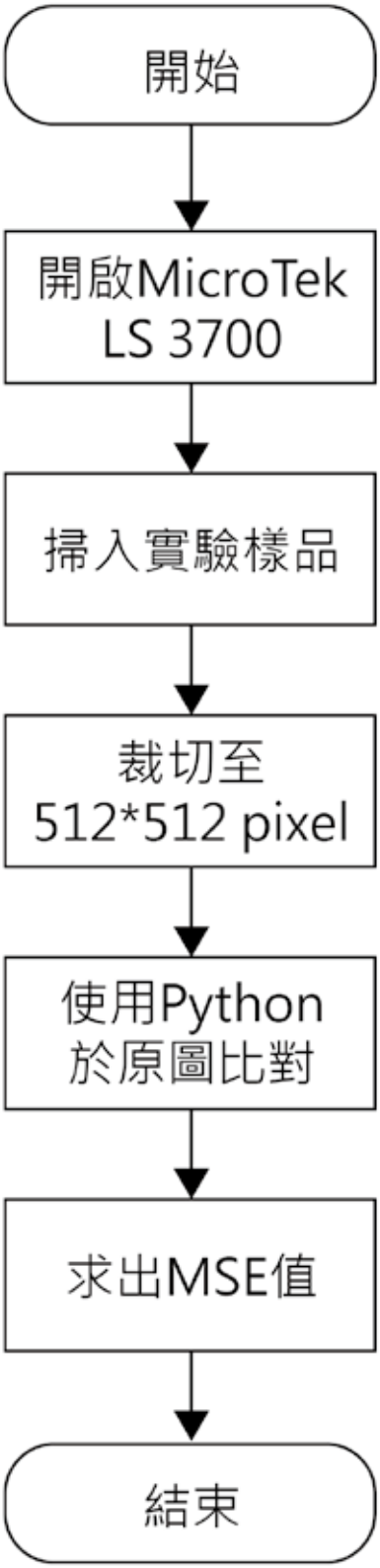


圖 3-5. 第二階段研究流程圖



肆、結果與討論

一、雕刻成品分析

1.實驗樣品分析：此節透過各雕刻成像的掃描檔案進行變項對成像的影響分析，主要以四大部分進行分析：高光、低光、整體亮暗以及細節呈現。
2.高光：圖片最亮處，以帽子右上部及右邊肩膀作為標準。
3.低光：圖片最暗處，以頭髮及身後的黑色曲線為標準。
4.整體亮暗：圖片整體的亮、暗。
5.細節呈現：顏色階調的多寡，以右手臂及臉頰為標準。
6.在討論交互作用時，排列順序則參考雙因子實驗設計 (Yates analysis)

二、色階圖分析

（一）功率

四種紙張在固定的速度下，雕刻功率設定較低時，會導致整體色階圖向上平移，也就是整體明度提高，由圖中可見整體明度的改變，造成的是色階圖在座標上的垂直平移，對於色階圖本身影響有限，沒有造成太多的變形，也就是不同功率時，階調的再現效果類似，功率的變化僅是造成整體明度的變化，在紙張上即是雕刻深淺的變化，可是當功率過高，會造成紙材的破損，所以在雕刻紙張時不宜功率過高，以免因為紙材破損造成安全問題或是機器的損壞。

（二）對比度

不同對比色階圖的分佈，大致都在平均 150 的平面上，不同的對比設定，不大會對複製影像的整體明暗變化造成影響，不同對比度在階調的表現上有較明顯的差異，可以看到在對比設定 -50 時，色階圖的起伏相對不大，亦即階調的表現不足，隨著對比的增加、色階圖的低峰與高峰差異逐漸增大，但是當對比過高時，反而整體色階圖縮減，代表著細節的流失。

（三）解析度

解析度的改變，不只是造成色階圖的平移，也使整體色階圖有所變化，當解析度設定低時，整體色階圖分佈在極亮處，階調變化平板，隨著解析度的增加，影像的明度也會下降，到比較接近原圖的範圍，階調變化也更趨明顯，在解析度 700 – 1000 dpi 時有最好的表現。

（四）抖點模式

抖點所造成的變化，除了抖點 2*2 整體明度較高以外，其影響在色階塗上的表現並不特別明顯，從樣品上可以看到影像的細節隨著抖點接數增加而更細緻，但是細節的增加在色階圖表現上並不明顯。

伍、研究結論與建議

本研究使用雷射雕刻技術，將影像複製至紙張，藉由不同的對比度、解析度與抖點階數組合，期望可以觀察到影像處理對於雷射雕刻於不同紙張上的影響，根據本研究的實驗結果，在本章對本研究下最後結論，並且提出對於未來實驗可能的方向之建議。

一、研究結論

本研究針對影像處理在雷射雕刻圖像上的影響，以影像對比度、解析度與抖點階數組合作為主要探討參數，除了單一因子的觀察，也有三者的交互作用分析，觀測方法有直接觀察實驗樣品，與並比對各樣品的 3D 立體色階分佈圖與原始圖檔的 3D 立體色階分佈圖之差異，並得到以下的結論：

1. 雷射雕刻將影像複製於紙張上，無法完整複製原圖的階調表現，但是藉由加工前適當的影像處理與加工時的參數設定，可以更加接近的複製原圖階調。
2. 在不同的紙材上，影像處理與加工參數的改變，會有相似的效果，但因為各種紙材加工適性的不同，而有程度上的差異。
3. 雕刻解析度設定對於雷射雕刻的階調複製有明顯的影響，較高的解析度設定可以更好的複製階調。
4. 抖點階數越高、色階分佈圖上影像分佈點會越趨密集，對於整體色調沒有明顯的影響，但是抖點階數影響視覺上影像的細緻度，階數高的影像看起來會比較精細。
5. 進行雕刻前的影像對比度調整，對於影像複製的階調會有影響，但是沒有像解析度那樣劇烈的影響，對比適中的影像可以較好的呈現階調以及整體色調，但是過高的對比會造成跳階。
6. 本研究所得出影像對比度、解析度以及抖點階數的組合中：對比度 +100、解析度 760 dpi、抖點 8*8，得出的影像保留多數細節、階調較豐富、階調轉折平滑，是能複製出較為接近原稿影像階調的雕刻參數設定。

二、研究建議與未來展望

本研究概略的對於影像處理應用於雷射雕刻有了初步的探究，對於後續的研究提出幾點建議與方向。

1. 磅數過低的紙加工時容易破損，可能造成安全問題與機器毀與機器毀損。
2. 進行部分紙材加工時，需將機器吹氣加大，避免過多粉塵附著於樣品上，例如本研究中的象牙卡。
3. 除了觀察色階圖，尚有其他可以量化並更精準檢測複製影像品質的方法，例如求出 MSE 值、色階圖比對等，是未來可以研究的方向。
4. 雷射圖形雕刻有廣大的應用範圍，研究者可以往更多不同的材料方面發展。
5. 由於雷射雕刻機所使用的演算法、參數設定可能因為廠牌不同而有所差異，未來可以利用印刷導表的概念，建立一雷射雕刻用的導表，來校正雷射雕刻機。

參考文獻

一、中文部分

Clare Taylor（2009）。香港印刷雜誌，48-50。取自 http://media.hkprinters.org/HKPM-50/HKPM50-Trend2.pdf

及思有限公司（民 103 年 12 月 19 日）。紙張第一課：塗佈紙 v.s 非塗佈紙。民 105 年 1 月 10 日，取自 http://jese-infini.com/2014/12/19/%E7%B4%99%E5%BC%B5%E7%AC%AC%E4%B8%80%E8%AA%B2%EF%BC%9A%E5%A1%97%E4%BD%88%E7%B4%99-vs-%E9%9D%9E%E5%A1%97%E4%BD%88%E7%B4%99/

文化用紙簡介。民 105 年 1 月 8 日，取自 http://www.clc.com.tw/products/include/duplex01.pdf

水彩畫 - 認識水材。民 105 年 1 月 8 日，取自 http://www.charts.kh.edu.tw/teaching-web/98watercolor/1-2.html

王瀛生 , 林裕仁 , & 李銘鍾 . (2003). 雷射雕刻技術應用於台灣地區自產材操作條件之試驗 . 臺灣林業科學 , 18(4), 401-408.

古志鵬（民 96）。影像處理應用於雷射標印系統之研究（碩士論文）。取自自臺灣博碩士論文系統。（系統編號：095NCUE5489015）

先鋒科技。民 105 年 1 月 9 日，取自 http://www.teo.com.tw/prodDetail.asp?id=1219

印刷佬兵。民 105 年 1 月 10 日，取自 http://www.colofor.com.tw/main/shop_content.php/coID/2

快印網。民 105 年 1 月 10 日，取自 http://ez101.com.tw/%E8%B1%A1%E7%89%99%E5%8D%A1.html

李嘉富、黃錦賢、郭慶堂（民 90）。認識雷射切割。行政院勞工委員會職業訓練局雷射加工能力本位訓練教材（編號：PMT-LSP0301）

林俊明 . (2014). 影像處理應用於壓克力雷射加工特性之研究 . 虎尾科技大學機械與電腦輔助工程系碩士班學位論文 , 1-78.

怎麼樣選擇水彩紙。民 105 年 1 月 8 日，取自 http://www.douban.com/note/262638598/

飛盟廣告設計 +Attey&Lin(民 99 年 2 月 11 日)。民 105 年 1 月 10 日，取自 http://famous1993.pixnet.net/blog/post/30337319-%E7%BE%8E%E8%A1%93%E7%B4%99%E5%BC%B5%E7%89%B9%E6%80%A7%E4%BB%8B%E7%B4%B9%E2%88%BC

楊隆昌。（民 103）。雷射發展的趨勢與應用。中工高雄會刊，23-33。

雷射知識網。民 105 年 1 月 9 日，取自 http://www.lasertech.tw/laser_noun.php?g_id=IyQlKiYlMTMlXiQqJio=

編輯手冊 - 貳紙張認識。民 105 年 1 月 8 日，取自 http://www.nknu.edu.tw/~newsclub/handbook/chap5-2.htm

戴孟宗 , & 湯椀婷 . (2013). 影響瓦楞紙雷射雕刻變數之探討 . 中華印刷科技年報 , 337-346.

蘇裕昌。民 94。塗佈紙印刷適性評估。漿紙技術 9-4，1-21。

二、外文部分

Mike Wakin(2003,Mar.23).Standard test image.Retrieved January 10,2016, from http://www.ece.rice.edu/~wakin/images/.

Radovanovic, M., & Madic, M. (2011). Experimental investigations of CO2 laser cut quality: a review. Nonconventional Technologies Review, 4, 35-42.

Wang, Y., & Su, W.-C. (2006). Effects of Printing Density and Color Settings in the Software on Performance of Laser Engraving of Wood-based Materials. 臺灣林業科學 , 21(3), 297-304. Author.