

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 工程學(一)科

第二名

052313

二維複合式凸輪於自動鏟花之研究

學校名稱：國立嘉義高級工業職業學校

作者： 職三 陳政緯 職三 黃楷程 高二 黃泓碩	指導老師： 張智賢 高文雅
---	-----------------------------

關鍵詞：複合式凸輪、鏟花、數莓派

摘要

在機械產業當中，工具機組裝中的配合面都會運用到鏟花這項技術，佔有極為重要的位置，現今當中鏟花主要還是以人工的方式來進行，並且是一項技術性高的工作，在課堂上也有看過業界的鏟花師傅示範，我們實際操作起來也不容易。

我們利用鏟花刀驅動機構來實現鏟花刀的軌跡，利用課堂所學到的知識和加工技術專業背景來開發機台，我們主要以 3D 列印機的運動控制為基礎，設計複合式凸輪機構，再藉由樹莓派控制 Python 程式語言控制鏟花刀轉向機構及鏟花刀驅動機構所需的機械動作，來達成具有不同角度及分布的鏟花承斑，這些操作都只需運用到觸控板控制數莓派便能減輕人工的負擔。

我們設計的機台具有自動化加工功能來取代人工，並且不會有人工傷害，也不需具備鏟花技術，操作介面簡便，人本成本低，便達成自動化的目標。

壹、前言（含研究動機、目的、文獻回顧）

一、研究動機

在上機械基礎實習課時，有從事鏟花行業的師傅來上鏟花課程，老師也有提供一些工業界有關鏟花方面的影片，讓我們對於鏟花有更進一步的了解整理出以下列幾點，1.鏟花這項技術在產業中的特殊重要地位及不可或缺性。工業界鏟花普遍一直是採用 2.人工的方式進行加工，講求經驗及操作技術，但 3.人工的方式受限於體力、工時、工作內容的枯燥性，4.操作人員也需要經過長時專業的技術和訓練，由上述幾點讓我們引起將鏟花機從人工操作轉化為機器自動化的想法。

在課堂上，老師也有教導我們自行組裝 3D 列印機，我們學到如何裝配機構、配置基本的電路裝備相關知識，3D 列印機的控制技術及運動特性，讓我們想到是否可以利用 3D 列印的架構，來實現鏟花機自動化的可能性，了解了 3D 列印的控制方法後，我們聯想到高一計算機課程中有學到 Python 程式語言，利用樹莓派執行 Python 程式語言，下達自動鏟花機的運動控制 NC 碼，使鏟花機能做出我們想要的動作。綜合以上概念，形成了我們的研究動機。

二、目的

由此上述研究動機我們定出了以下目標：

- (一) 設計一台低成本、取代人力以及縮短加工時間的自動鏟花機，從原本的人工鏟花轉為自動鏟花，符合工業自動化的目的。
- (二) 設計自動鏟花刀頭驅動機構，此機構能產生和人工鏟花的刀頭一樣的路徑，進行鏟花工作。
- (三) 改裝 3D 列印套件到工件自動位移平台，整合自動鏟花刀頭機構和樹莓派處理器，形成自動鏟花機台。
- (四) 研究鏟花承班最佳分佈策略，縮短自動鏟花時間，增加鏟花效率並可達到鏟花後的檢測標準。
- (五) 利用樹莓派和觸控螢幕，撰寫控制介面程式，做為控制器使用。
- (六) 利用自動鏟花機構之定位控制開發精準鏟花加工方法。

三、文獻回顧

鏟花的功用主要有 1.修正加工時因為熱變形、加工夾持與機械精度不良導致的誤差 2.讓表面產生油袋，產生油膜用以潤滑軌道，減低軌道摩擦力。[1]現今科技進步，以往都要靠人工的方式才能修整好平面，在各式的 CNC 機器(如圖 1 所示)及鑽石/CBN 刀具(如圖 2 所示)已經可達成平面甚至是鏡面的效果。但形成油袋靠這些工具及刀具是難以達到的，還是需要透過人工鏟花來完成。



圖 1 CNC 精密平面磨床[2]



圖 2 鑽石/CBN 刀具[3]

一般精密平面如果沒有經過鏟花處理，如圖 3 所示，當機件在滑動的過程當中，油會因為沒有地方留存，每一次滑動都會將表面的潤滑液刮出，使油膜不停薄化，最後會因為沒有油膜，使機件彼此磨擦損耗。在有鏟花過的平面，

如圖 4 所示，鏟花紋在加入潤滑油後，工件表面會形成油袋，運動過程中油膜會一直保留住，因此大大提升機件的壽命。

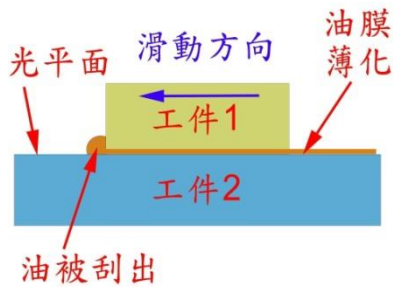


圖 3 無鏟花光平面



圖 4 鏟花表面

(一) 一般鏟花[4]

鏟花方法:

1. 建立斑點：鏟花加工的第一步建立斑點，在已經加工完成的表面，利用鏟花刀鏟出深度及長度一樣的紋路，讓塗料可以附著於工作面。
2. 去毛邊：用磨石清除毛邊。
3. 抹紅丹：將工件表面均勻抹上紅丹。
4. 顯現高點和承斑：將樣板與工件相互堆疊，並平行來回推移。
5. 去除高點：拿走樣板後，可發現表面有高點，再利用鏟刀將其鏟除。
6. 循環以上動作：重複循環以上動作，已完成鏟花工作。

鏟花面品質標準(表 1)[來源：虎尾科技大學碩士論文][5]

等級	每平方英吋高點數	用途
超精密鏟花面	22~30	標準平板、標準平板治具、直規、其他超精密的表面
精密鏟花面	10~18	精密工具機導軌、精密表面
一般鏟花面	6~8	重型機器的寬大導軌面、需要栓合且油密的表面
粗糙鏟花面	3~5	粗糙或重型機器的導軌、大致吻合且需栓合的表面

整治或造型	1~2	大致吻合的表面且不要求直角度或精確度的大型機器零件之配對
-------	-----	------------------------------

在鏟花平面中，鏟花品質是由 PPI(每平方英吋的高點數)及 POP(每平方英吋的接觸率)所決定的，[6]在鏟花點數與接觸面積之關係如下圖 5 所示，不同的高點數用途也不會相同，當高點數多時，相對的越適合用在高精密的表面上，反之，高點越少時，就只能用在精密要求度不高的表面。如下圖 6 中，可以發現 POP 在最好的範圍落在 50%，但考量加工時的難度，40%到 60%也是在可以被接受的範圍內。

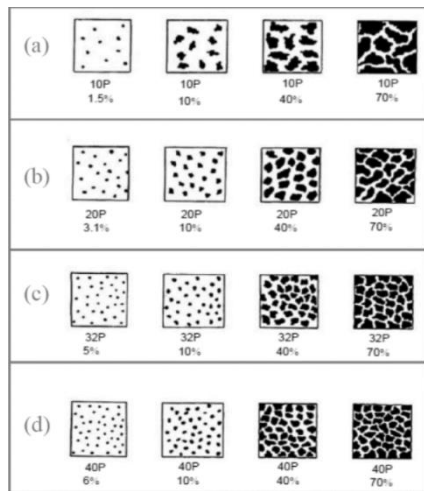


圖 5 鏟花點數與接觸面積之關係

參考文獻[6]

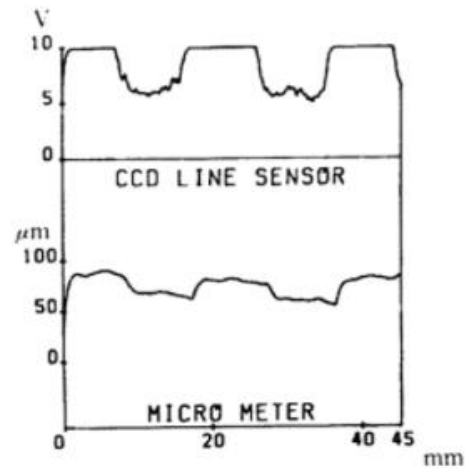


圖 6 CCD 感測器鏟花承斑剖面

參考文獻[6]

(二) 現有自動鏟花機[7]

手持電動鏟:在鏟花過程中，一些整平的作業都可以靠電動鏟花來完成，因此能大幅減少工作的時數，讓鏟花作業不再這麼累，不過使用電動鏟花也需要有一定的技術，才可以排出完美的花紋，但在最後精細的步驟時，仍須靠純熟的手工鏟花來完成。

貳、研究設備及器材

一、研究設備與機台

研究設備及器材：

- (一) 車床
- (二) 銑床
- (三) 加工中心機
- (四) 鑽床
- (五) 刀具及量具
- (六) Arduino-RAMPS 運動控制板
- (七) 步進馬達
- (八) Solidworks、AutoCAD、Python 及 Mastercam 軟體
- (九) 樹莓派 (Raspberry pi4)

開發機台所需材料：

機台所需材料			
項次	設備名稱	規格備註	備註
1	自動鏟花機構	中碳鋼、低碳鋼、黃銅	依各零件設計尺寸加工
2	機台	6061 鋁	依各零件設計尺寸加工
3	XY 平台、虎鉗	中碳鋼、鋁	市售成品改裝
4	Z 軸	中碳鋼、鋁	市售成品改裝

參、研究過程或方法

一、研究流程

在初步和老師討論後，分析研究過程可能會面臨到的技術問題及一些專業問題，我們擬定了本項研究開發的心智圖，如圖 7 所示，有此開發心智圖，方便我們的成員在工作任務上的分配，老師也有帶我們體驗有關鏟花的活動，其餘各項開發的工作及日程則由實驗記錄簿來書寫記錄。不過在工作當中會有無法預期的問題會陸續浮現，所以在鏟花刀頭機構的設計上因採用不同的傳動機構方式，也會不斷的實驗及修正，最後選定出本機台最適合的設計策略。

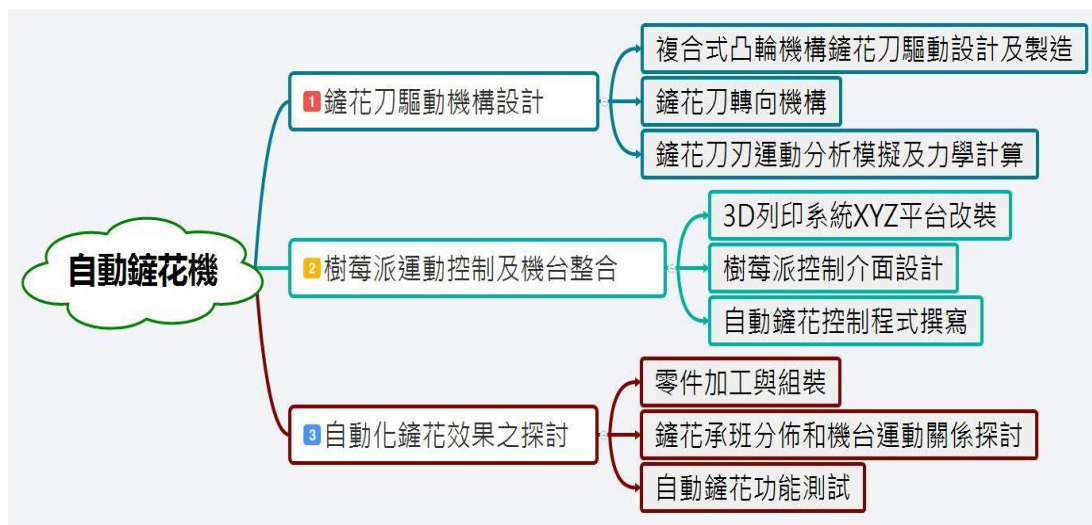
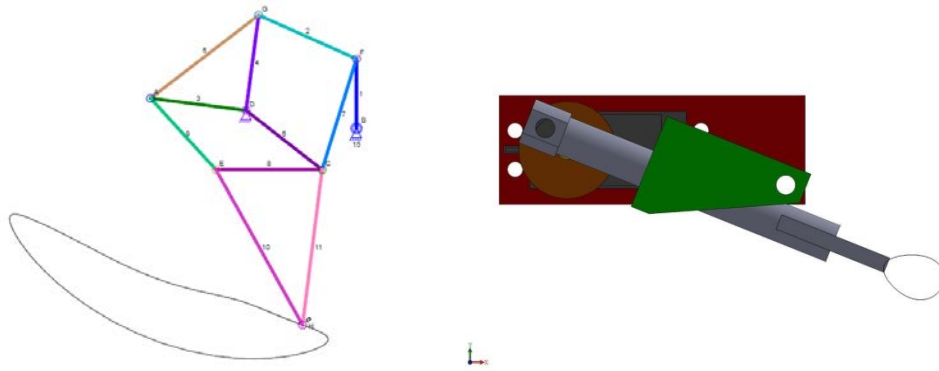


圖 7 自動鏟花機開發過程心智圖

二、鏟花刀驅動機構設計

在人工鏟花工作的觀察中，以及鏟花刀的運動軌跡在側面形狀是一個類似”D形”軌跡的重複性運動，在高二的機件原理課程中，我們有看到四連桿機構能做出 D 字形的軌跡運動，因此我們利用 linkage 軟體及 Solidworks Motion 來設計模擬四連桿及擺動滑塊機構的運動如圖 8 (a) (b) 所示，由於這種設計方式只能利用嘗試錯誤的方法來調整運動軌跡。在一番努力後軌跡成果不論是形狀或尺寸還是不甚理想，因此放棄使用四連桿機構來做為自動鏟花刀頭的設計。



(a)linkage 軟體模擬四連桿

(b)Solidworks Motion 模擬擺動滑塊

圖 8 四連桿做 D 形運動軌跡模擬

在分析 D 形軌跡運動中我們發現，如果在一個平面上二個軸向的運動複合並聯在一起，即可形成一個平面二維的運動軌跡。因此我們將鏟花的 D 形平面運動軌跡，分別分解為二維的不同運動形態，再進行二維的機構設計，各軸運動結合後最終即可達到我們要的 D 形軌跡。(這類似平面上一個圓是由 X 軸做 SIN 運動，Y 軸做 COS 運動複合而成)；就此分析，我們採用二個凸輪來做為二維的運動設計，各軸運動並聯複合後即為設計的 D 形的軌跡，如圖 9 與圖 10 所示。

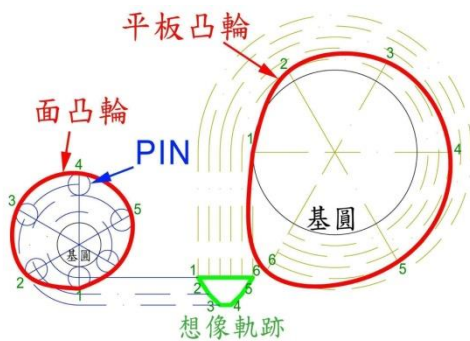


圖 9 二維複合式凸輪設計概念

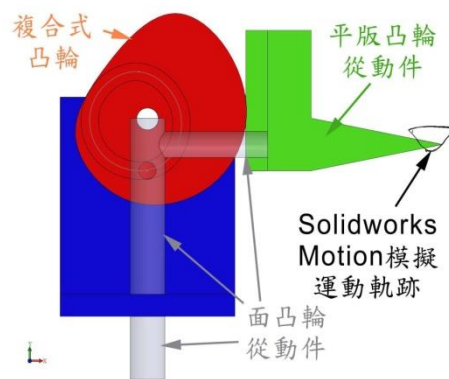


圖 10 Solidworks Motion 模擬

由上述並聯凸輪機構運動的思考模式，我們分析鏟花刀的路徑類似 90° 旋轉之 D 字，單一凸輪無法產生此動作，所以以結合兩個凸輪來並聯出鏟花刀頭的軌跡，設計概念及過程如下：

三、二維複合式凸輪設計步驟

(一) 定出鏟花刀刀路徑如圖 9 的想像軌跡

(二) 凸輪周緣設計，從周緣位置 1→2→3→4→5→6 循環

(三) 凸輪設計成兩部分

1. 面凸輪: 拘束鏟花刀的旋轉中心及刀頭抬升動作，如圖 9 左側所示，因想像軌跡距離一樣，因此我們將圓 360° 分為六等份，每一等份 30° ，在下方位置以順時針繪製 1→2→3→4→5→6。
2. 平板凸輪: 產生刀頭前進動作，如圖 9 右側所示，我們將圓 360° 分為六等份，每一等份 30° ，在左方位置以順時針繪製 1→2→3→4→5→6。

(四) 再將兩個凸輪合併繪製於 Solidworks 再用 Motion 功能驗證軌跡，模擬出來的軌跡如圖 10 所示，可以發現圖形較圓滑這是因為使用雲形線繪製。

我們把這種可作 X-Y 動作的兩種凸輪組合，稱為二維複合式凸輪，這種方法可以快速方便設計出想要的運動軌跡，不需用嘗試錯誤方法。因為鏟花軌跡幅度小，如使用上述的機構，加工精度要很高，為了降低加工的困難度，我們採用線軌加一轉軸設計，製作成擺動從動件型的二維複合式凸輪，設計圖如圖 11 所示。我們先將軌跡設計為高 3mm，長 9mm 像打勾一樣的 D 型軌跡，第一點到第二點佔 5/100，第二點到第三點佔 1/100，第三點到第四點佔 1/100，第四點到第五點佔 2/100，第五點到第一點佔 1/100，透過 Solidworks Motion 模擬如圖 12 所示。

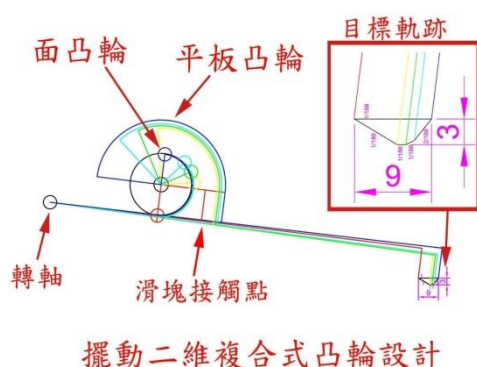


圖 11 擺動型二維複合式凸輪

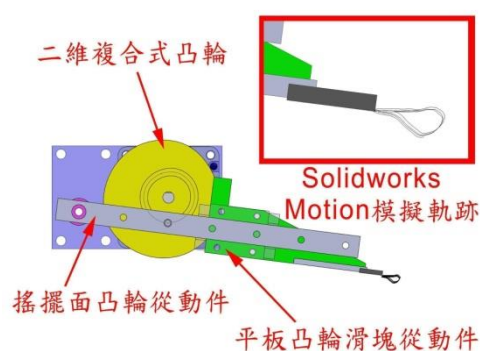


圖 12 擺動型二維複合式凸輪模擬

結合凸輪機構並以步進馬達做為動力來源後最終設計出的鏟花刀驅動機構如圖 13 所示，依據圖 13，可推導出如圖 14 所示之作用力。

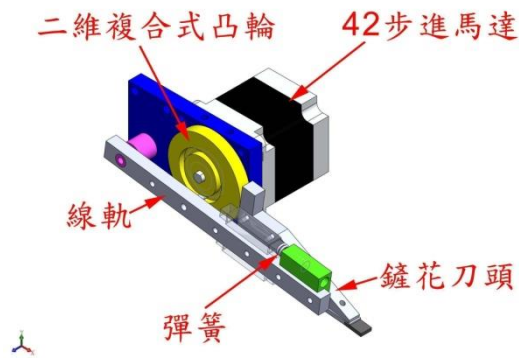


圖 13 鏟花機構設計

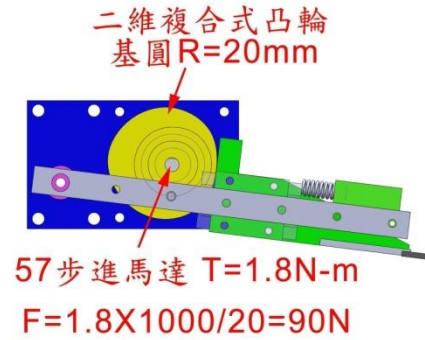


圖 14 鏟花機構作用力示意圖

四、凸輪壓力角及驅動馬達扭力分析

凸輪旋轉推動從動件使鏟花刀頭產生 D 字形運動軌跡，切入工件形成鏟花斑，因此馬達所需的扭矩大小決定了刀刃是否可以切入工件，如圖 15 所示，凸輪和從動件間的壓力角為 7° (圖面量測)，鏟花刀和工件間的夾角為 10° (設計值)，所以馬達扭力為基圓半徑、 $\sin 7^\circ / \sin 10^\circ$ 及鏟花正向力的乘積，實測中鏟花正向力大約 50 Nt，凸輪基圓為 20mm，因此所需馬達扭為 1 N-m，我們使用的 57 式步進馬達為 1.8 N-m。

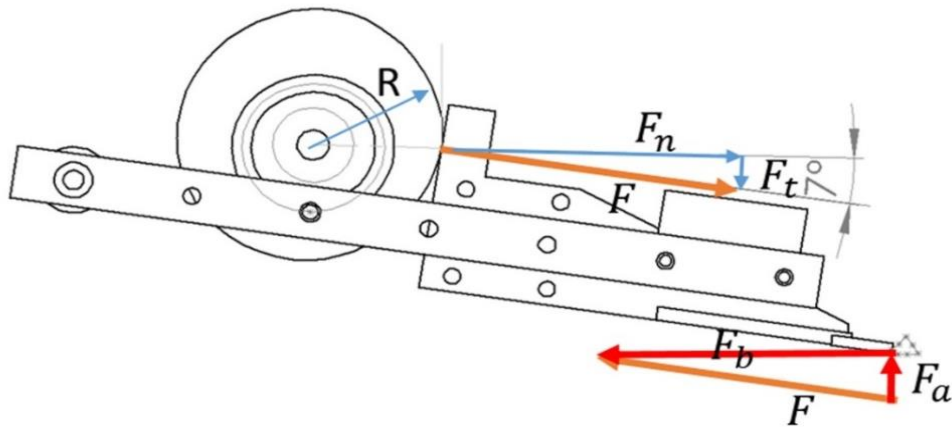


圖 15 壓力角及扭力分析

F = 鏟花刀所受阻力

F_a = 實測鏟花壓力 (正向力)

$$F = \frac{F_a}{\sin 10^\circ} \text{ (} 10^\circ \text{ 鏟花刀水平夾角) 公式(1)}$$

F_t = 凸輪所受切線力量

$$F_t = F \times \sin 7^\circ \text{ (} 7^\circ \text{ 凸輪壓力角) 公式(2)}$$

$$T = F_t \times R \text{ (馬達扭力) 公式(3)}$$

五、鏟花刀刀固定件變形分析

在鏟花刀的驅動機構設計中，凸輪從動件和鏟花刀刀固定件整合為一個零件，由於形狀中有斷面比較薄的部分，因此在分析完受力後，我們使用 Solidworks Simulation 進行變形分析，如圖 16 (a)，看變形量是否會影響到鏟花刀刀的運行，因為我們採用中碳鋼，強度較大，最大變形量為 2.9 μm ，如圖 16(b)所示，此變形量比零件加工誤差還要小，因此可忽略不計。

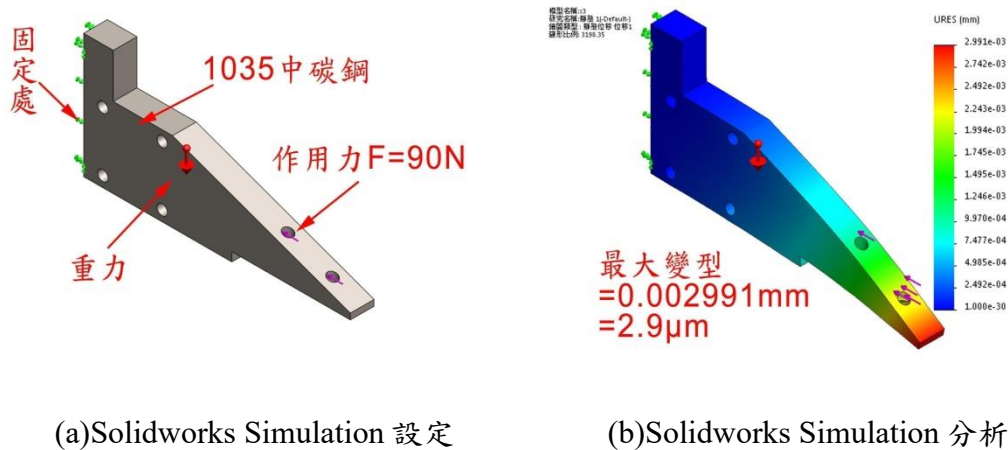


圖 16 鏟花刀刀固定件變形分析

六、鏟花刀角度與 R 角規

在 R 角規設計過程中，利用雷射切割機做出我們想要的規格，四邊為鏟刀的尺寸，內側為檢測一英寸×一英寸鏟下每個點的刀痕，做出來的尺寸規格如圖 17 所示，依據 [8] 的規範，如圖 18 鏟刀與 R 角規夾角為 95°，在刀片的研磨，以 3000 粒度以上的砂輪，能鏟出亮度佳的表面。

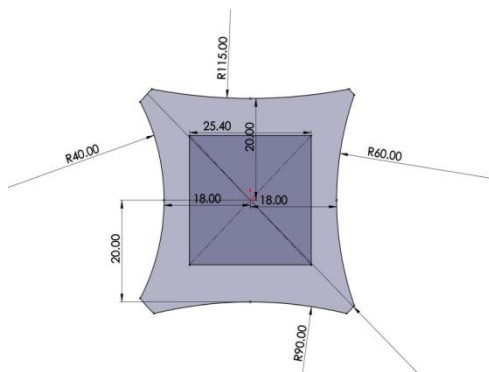


圖 17 自製 R 角規示意圖

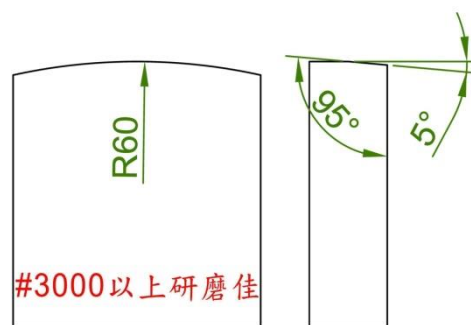


圖 18 鏟刀角度

鏟刀的製作過程中，我們用銑床銑削車床內孔刀，分別銑出四種不同規格的鏟刀如圖 19 所示，在上述 R 角規雷射切割完後，成品如圖 20 所示。

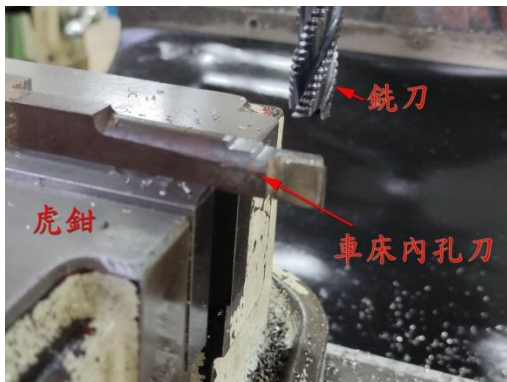


圖 19 自製鏟刀

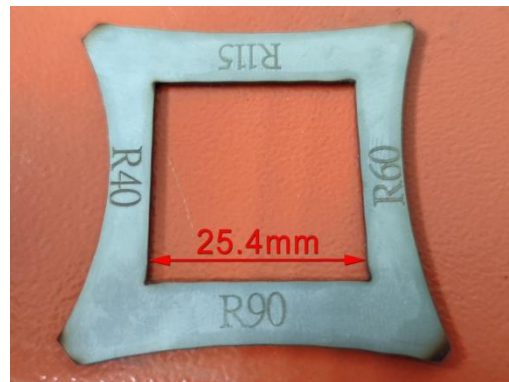
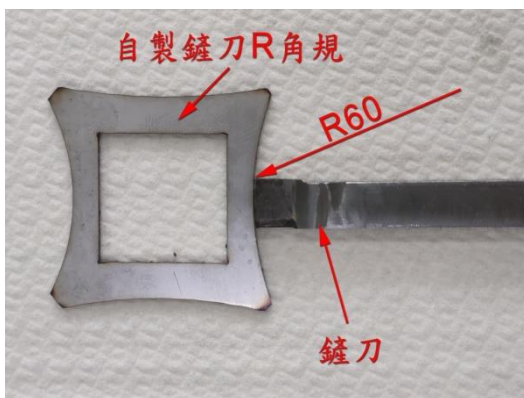
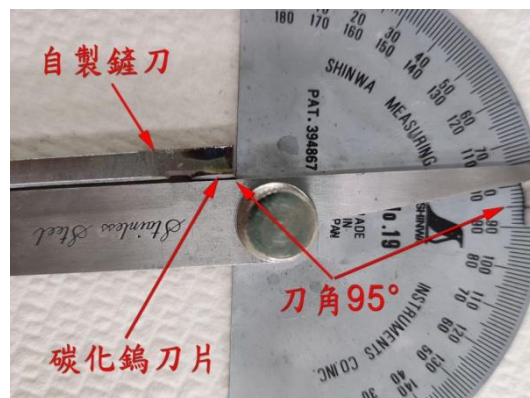


圖 20 R 角規實體

做完鏟刀及 R 角規，配合起來符合我們想要的規格，我們也利用了量角器量出不同的鏟刀角度如圖 21 (b) 所示，角度也都有符合當初的設計。



(a)R 角規與鏟刀半徑配合



(b)量角器與鏟刀配合

圖 21 鏟刀與量具配合

七、鏟花刀轉向機構設計

為了在自動鏟花過程中，能夠鏟出不同旋轉角度的鏟花承斑，我們在鏟花驅動機構上加裝一個旋轉臂，並由一顆 57 步進馬達來做用動力來源，如圖 22 所示，步進馬達旋轉時帶動鏟花驅動機構旋轉一個角度，如此即可鏟出各種不同角度的鏟花承斑，此旋轉機構設計時，旋轉軸心通過鏟花刀刀，如此方式可使得在自動鏟花時，鏟花承斑可原地旋轉，運動控制的計算較為簡便。

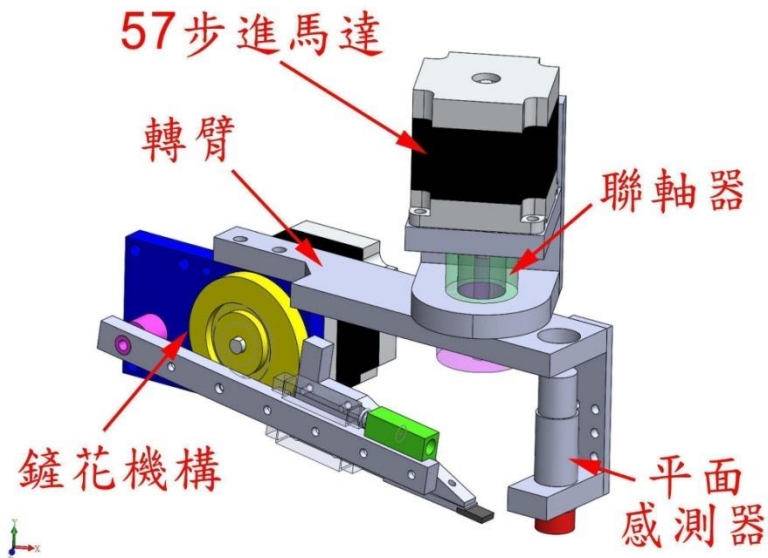


圖 22 鏟花刀轉向機構設計

八、自動鏟花機運動平台組合設計

3D 列印機台的硬體裝置是由驅動 XYZ 的 3 個軸向步進馬達及控制馬達的運動控制板所構成，由運動控制板讀取 NC 碼來控制列印平台 XYZ 的運動，目前所用的控制板可以達到 5 軸向的運動控制，XYZ 三個直線運動軸向及 A、B 二個旋轉軸向，剛好符合本機台設計時構想的運動軸數。我們改裝 3D 列印機的運動平台，組合上述的鏟花刀驅動機構及鏟花刀轉向機構，形成一台自動鏟花機，機台的構造及各部位名稱如圖 23 所示。

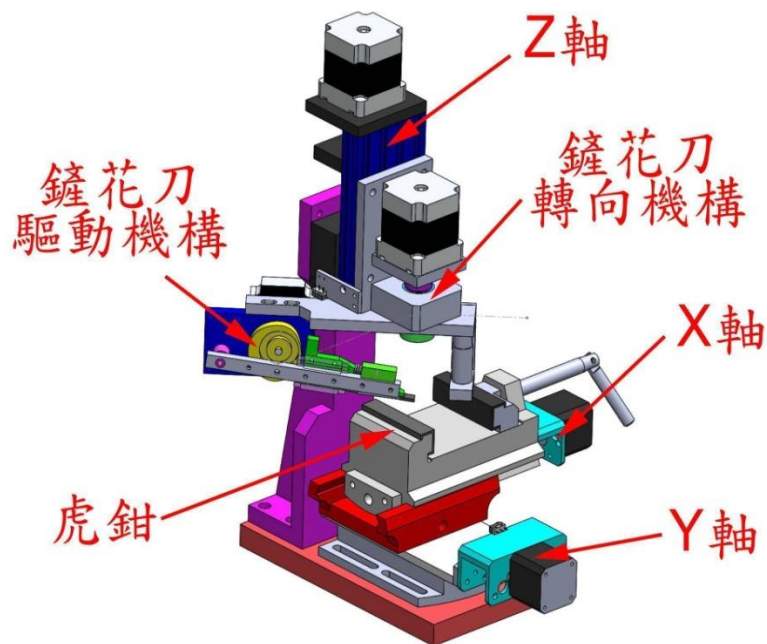


圖 23 自動鏟花機構造圖

九、樹莓派 Raspberry pi4 控制器與 Marlin 的設定

因為我們學過 3D 印表機組裝，因此我們選用與 3D 印表機主板加上樹莓派 Raspberry pi4 作為電控系統，由樹莓派撰寫 python 運動控制程式來控制機台上的 X 軸、Y 軸、Z 軸、鏟花驅動軸與鏟花刀轉向機構，命令由樹莓派下達 NC 碼，經 3D 印表機主板上的韌體 Marlin 接收後，控制各軸的步進馬達轉動。機台因此需要五個馬達控制，用了兩個 A4988 與 42 步進馬達控制 XY 移動，三個 S109+57 步進馬達分別控制 Z 軸、鏟花驅動軸與鏟花刀轉向機構，以及自動調平的 BLTOUCH，其架構如圖 24 所示：

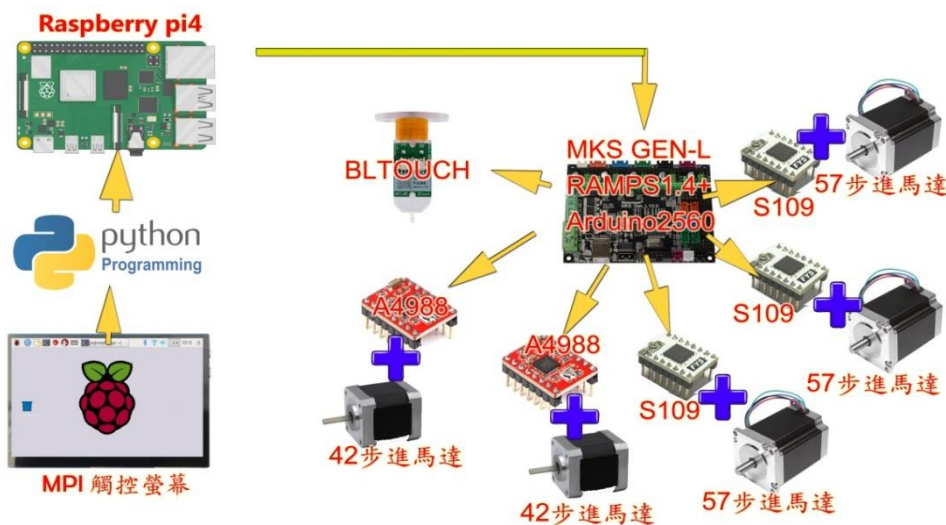


圖 24 電路控制圖

3D 列印機主板的韌體是由我們用學過的 Marlin2，因為傳統的 3D 列印機是使用 XYZE 四軸，我們的系統需要用到五個軸向，除了 XYZ 與 3D 印表機相同，E 軸也可作為我們使用的軸，但 E 軸是沒辦法回原點的，因此我們將 E 軸也捨棄掉，設上新的兩軸，分別是繞著 Z 軸旋轉的鏟花刀轉向機構定義為 C 軸與鏟花驅動軸為 A 軸，還另外增加兩個極限開關控制。

3D 列印機主板的韌體 Marlin2 在步進馬達的單位設定分別為：

$$X、Y 軸：\frac{\text{每轉Step值}}{\text{導程}} = \frac{3200}{1.5} = 2133，$$

$$Z 軸：\frac{\text{每轉Step值}}{\text{導程}} = \frac{6400}{4} = 1600，$$

$$C 軸：\frac{\text{每轉Step值}}{360^\circ} = \frac{6400}{360^\circ} = 17.7，$$

$$A 軸：\frac{\text{每轉Step值}}{\text{預計多少單位轉完一圈}} = \frac{6400}{4} = 1600。$$

十、運動控制 NC 碼(樹莓派操作界面說明)

樹莓派 Raspberry pi4 是一個微形單板電腦，其作業系統可執行 python 程式，我們利用 python 撰寫一個視窗程式做為鏟花機的控制器，由樹莓派送出 NC 碼給 Marlin2，使得步進馬達可以作動，NC 碼的定義如表 2 所示。為了達到自動鏟花的功能，我們將控制器的視窗介面程式設計成如圖 25，此視窗介面搭配一個 7 吋的觸控螢幕，直接觸控操作機台。



圖 25 控制器的視窗介面

為了達到鏟花承斑的多樣性，操作介面設計有一些參數的設定，參數名稱和鏟花承斑的關係如圖 26 所示，此介面並設計了部分鏟花功能，可將鏟花面積分為 16 個部份區域，來執行部份鏟花，操作介面中也有一個 Z 軸的設定參數也可設定鏟花刀的 Z 軸高度。鏟花進度執行條可顯示鏟花的執行進度，輸入按鈕區則可使用觸控方式來達到參數的修改與輸入。

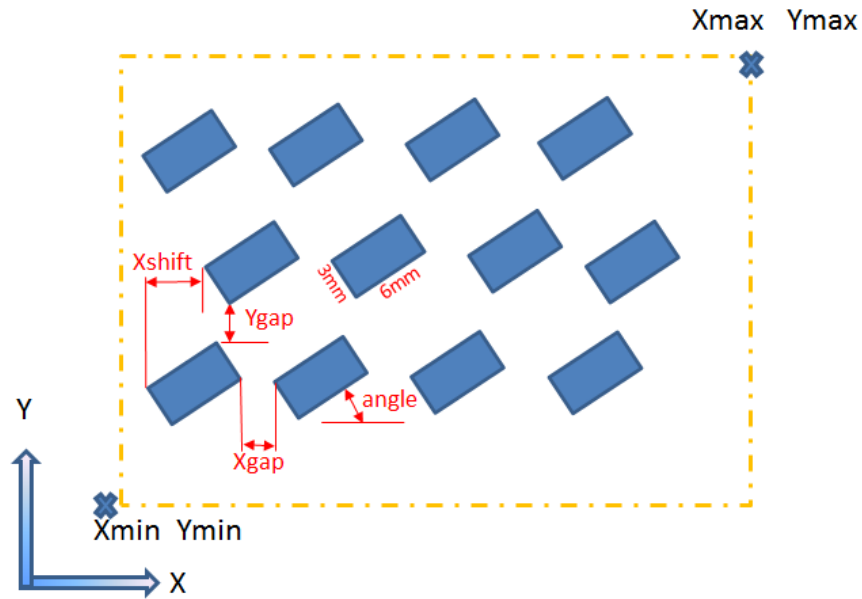


圖 26 參數名稱程鏟花承斑的關係圖

表 2 NC 碼相對運動

NC 碼	運動控制說明
G28	回歸原點
G90	絕對座標
G0 X0 Y0 Z5	移動至 X0 Y0 Z5
G0 Z-1	Z 軸移動至-1
G1 C45 F4000	C 軸轉 45 度
G1 X2 F300	X 軸移動 2
G91	相對座標變更
G1 Y2 F300	Y 軸移動 2
G1 A4 F300	鏟花動作

肆、研究結果

一、機台零件加工及機台組裝

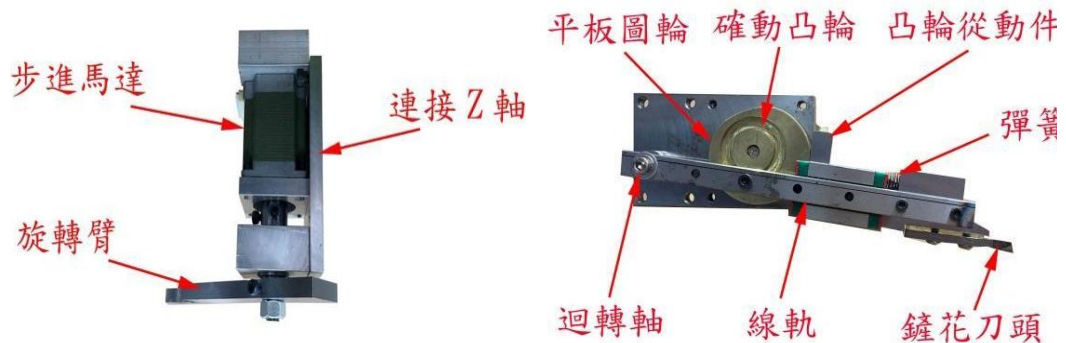
由上述的各項機構如圖 27，組合完成後如圖 28 所示，再經由樹莓派 Raspberry pi4 的觸控程式介面來測試機台及參數的調整。

(一) 鏟花刀轉向機構(a):為了能鏟出不同角度的花紋，我們在機構上裝了旋轉臂，在配合一個步進馬達旋轉出一個角度，來達成不同角度的鏟花承斑。

(二) 鏟花刀驅動機構(b):我們採用二個凸輪來做為二維的運動設計，稱之為二維複合式凸輪，在平板凸輪上，刀頭會產生前進動作，在確動凸輪上，會拘束鏟花刀的旋轉中心及刀頭抬升動作。

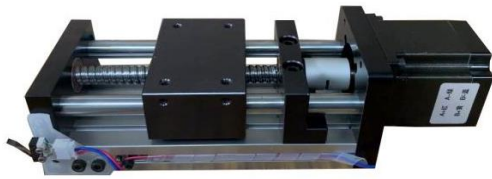
(三) Z軸(c):用來自動偵測平面，檢測工件表面高度，使鏟刀能進行準確地下刀動作，操作介面中也有一個Z軸的設定參數也可設定鏟花刀的Z軸高度。

(四) X、Y 移動平台(d): 利用控制介面可控制工件位置，使鏟花刀能移到我們想要的指定位置。

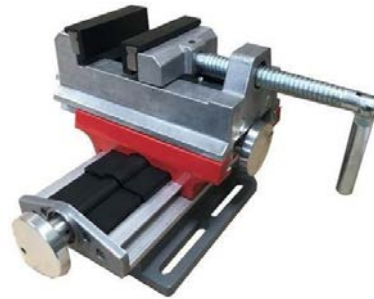


(a) 鏟花刀轉向機構

(b) 鏟花刀驅動機構



(c) Z 軸



(d) X、Y 移動平台

圖 27 各項機構圖

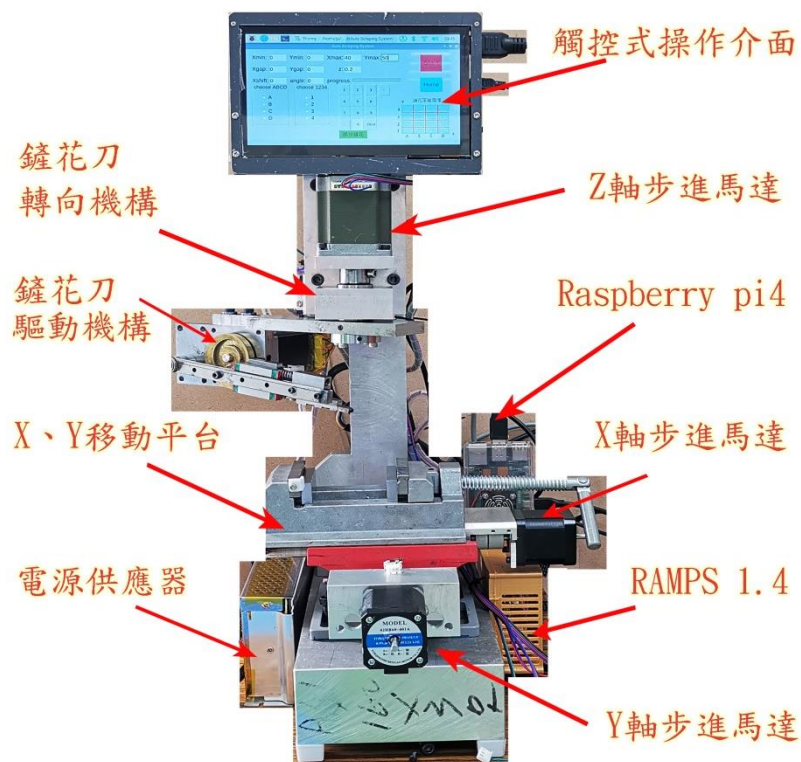




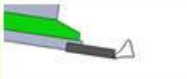



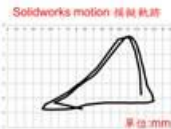
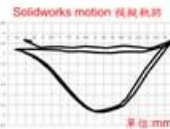
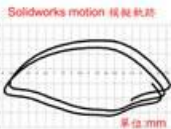
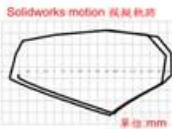


圖 28 整機組裝組合圖

二、鑄花刀驅動凸輪測試

在鑄花刀驅動機構中，我們利用複合式凸輪來實現鑄花刀的作動，我們分別做了四顆凸輪，利用 Solidworks Motion 模擬鑄刀作動的軌跡，經過比較後如表 3 所示，在表中可知，四階段不同設計之凸輪軌跡，以凸輪 4 的行進軌跡較長且行程時間比回程時間減少許多，測試結果為凸輪 4 最符合我們所需要的情況。

表 3 凸輪之比較

	凸輪1	凸輪2	凸輪3	凸輪4
凸輪外型				
鏟刀與軌跡				
模擬軌跡座標圖				
行程時間(去:回)	1:1	1:1	2:1	3:1
測試結果	鏟花承斑不明顯	阻力太大無法驅動	測試結果良好	測試結果良好且時間縮短

三、鏟花刀旋轉軸中心調整及鏟花平台平面檢測

為了使鏟花承斑多樣化，使鏟花承斑交叉或斜向分布，因此設計了一個旋轉軸機構，可以使整組鏟花機構做旋轉動作，此旋轉軸機構必須以鏟花刀為旋轉中心，我們進行旋轉軸中心調整，調整前後的鏟花承斑交叉效果，如圖 29 所示。

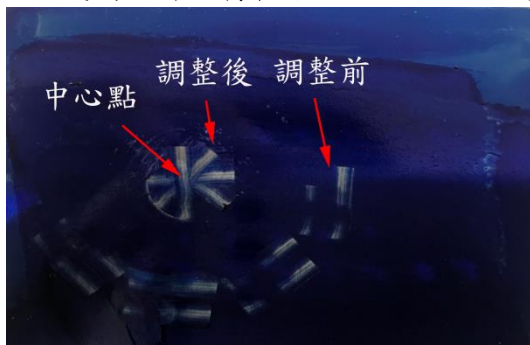


圖 29 鏟花刀旋轉軸中心調整



圖 30 平台平面度

配合鏟花承斑腹部在整個工件表面，我們使用一個由步進馬達控制的 XY 平台來做為工件移動的機構裝置，為了避免此平台的平面度影響自動鏟花的效果，我們進行了鏟花平台平面度檢測，檢測架構如圖 30 所示，檢測範圍為 54×60mm，檢測結果平面度誤差大概在 10μm 左右，為了彌補此誤差，我們使用 3D 列印機中的自動調平裝置(BLTouch)如圖 31 所示，來補償平台平面度誤

差，我們將工件斜置，並啟動 Marlin 自動調平 G29 檢測，如圖 32 所示。該功能確實能檢測出物體傾斜，該裝置也作為 Z 軸原點偵測使用。

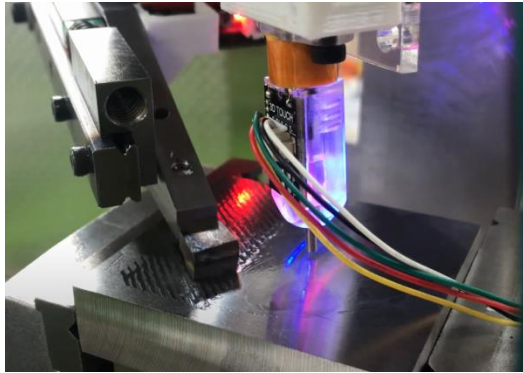


圖 31 自動調平裝置

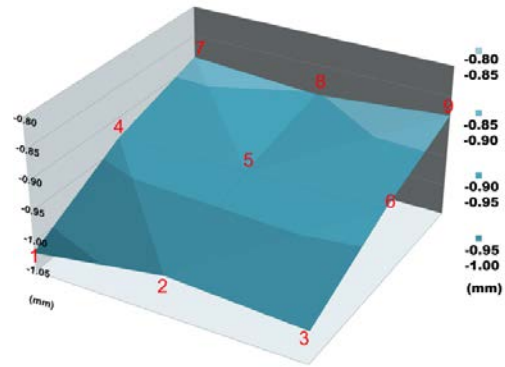


圖 32 物體傾斜時檢測數據

四、鏟花承斑深度實驗

人工鏟花須經由多年的培訓累積經驗，鏟花時能控制手臂的力道後，才可以鏟出標準鏟花承斑外型與深度，但自動鏟花機鏟花承斑的形狀，須由凸輪外型、鏟花刀頭形狀及 Z 軸深度設定來控制，因此我們做了 Z 軸平台的深度設定和鏟花承斑深度量測結果關係的實驗，如圖 33 所示。

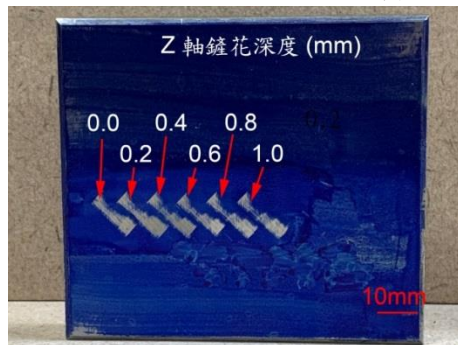


圖 33 鏟花表面深度

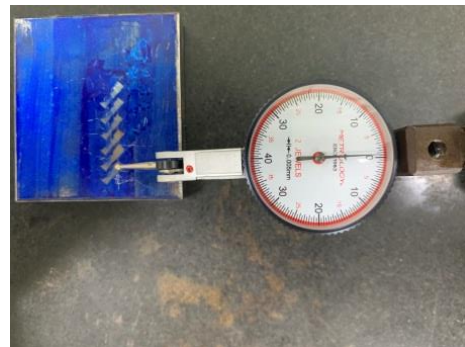


圖 34 鏟花槓桿量表量測

各種 Z 軸鏟花深度設定經槓桿量表(槓桿量表精度 $5\mu\text{m}$)測量結果，如圖 33 與圖 34 所示，發現 Z 軸深度設定在 -0.4mm 後，鏟花承斑深度的量測結果，指針在 $10\mu\text{m}$ 刻度左右擺動，不再做變化，因此大於 -0.4mm 的 Z 軸深度設定對鏟花承斑深度不再影響，初步推測原因為機構組裝誤差及鏟花刀轉向機構剛性不足，因此在做自動鏟花時，我們將 Z 軸深度的設定為 -0.4mm ，若設定太深會造成馬達失步，根據上述文獻討論[6]，Takeuchi 利用 CCD 感測器量測，因此我們設定在深度 $10\mu\text{m}$ 到 $20\mu\text{m}$ 。

五、鏟花速度、寬度與長度

在自動鏟花機鏟花過程中，鏟花承斑的寬度由鏟花刀頭的形狀來決定，鏟花承斑的長度由上述複合式凸輪外型設計決定，我們考量馬達的功率及機台本身的大小，將鏟花承斑的寬度和長度設定在 $3\times 6\text{mm}$ ，實際鏟花經量測結果如圖 35 所示，鏟花承斑的形狀符合我們的需求

在實際的鏟花過程中，我們發現鏟花刀頭鏟花的速度(即鏟花刀頭與工件表面相對運動速度 m/min)，鏟花速度越快，鏟花刀頭與工件接觸時間短，鏟花速度越慢，鏟花刀頭與工件接觸時間長，接觸時間會影響鏟花承斑的形狀，因此我們做了鏟花速度與鏟花承斑關係實驗，如圖 36 所示，當速度越快鏟花承斑寬度發生變形，從實驗中我們發現鏟花承斑速度 $550(\text{m/min})$ 以上，鏟花承斑開始變得不完整，而在速度 $500(\text{m/min})$ 以下，鏟花承斑是完整的，為了達到較高的效率所以我們取決鏟花承斑速度 $500(\text{m/min})$ 。

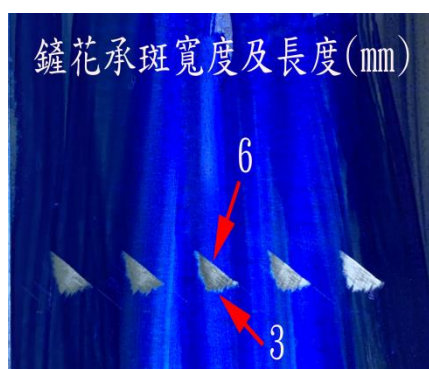


圖 35 鏟花寬度與長度

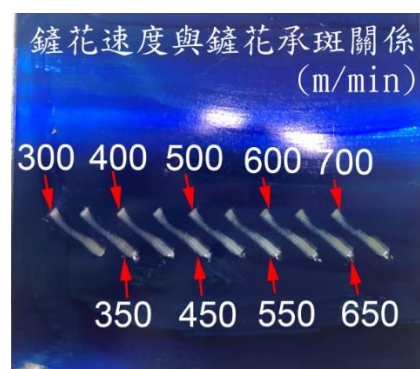


圖 36 鏟花速度

為了增加鏟花效率我們檢測 XY 平台的進給速率，當 X 平台在低於 F3500 前，都能在正負 0.01mm 的精度，直到 3600 時步進馬達開始失步如圖 37，誤差開始變大，因此 X 的最大進給率為 3500，保險起見我們選擇 3300；Y 平台在低於 1700 前，都能在正負 0.01mm 的精度，直到 1800 時步進馬達開始失步如圖 38，誤差開始變大，因此 X 的最大進給率為 1700，保險起見我們選擇 1500，Y 軸沒辦法跟 X 軸一樣的速度是因為承受了 X 軸的重量，所以速度只有 X 的一半左右。

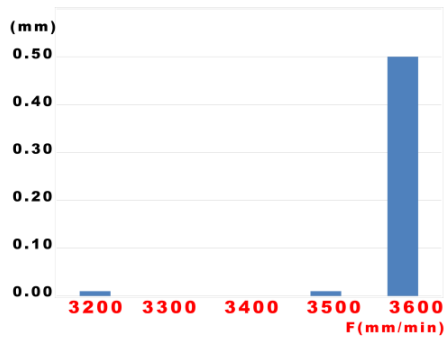


圖 37 X 軸最大 F 值

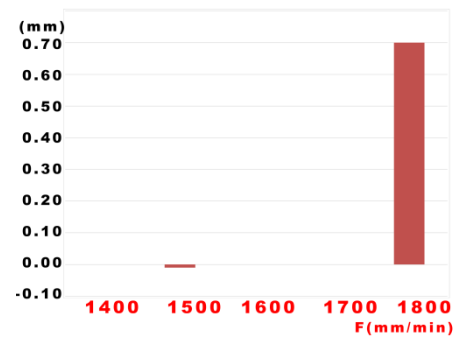


圖 38Y 軸最大 F 值

六、自動鏟花功能測試

在樹莓派上撰寫一 python 的圖形化介面，搭配一個觸控螢幕，使樹莓派做為一個自動鏟花控制器使用，圖形化介面的執行流程如圖 39 所示。我們並使用此一介面程式來做為自動鏟花機構的功能測試，

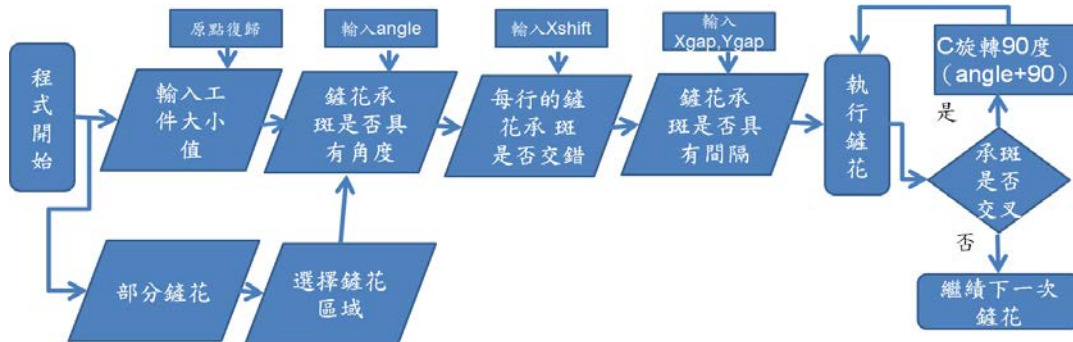
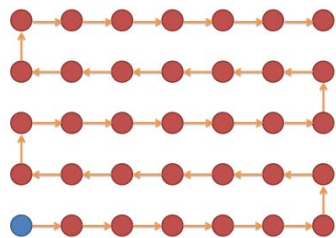
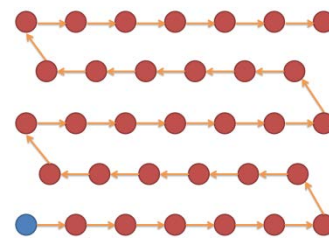


圖 39 Python 程式流程圖

在鏟花的路徑有二種規劃方式，第一種是具有規律性排列的路徑如圖 40 (a)，另一種題奇偶數排之間具有交錯位移的排列，如圖 40 (b)，這二種路徑在操作介面上是由 Xshift 這個參數來設定，Xshift 若為 0 則是規律性排列，若不為 0 則由當中的數值來決定交錯大小。



具有規律性路徑圖 (a)



具有交錯路徑圖 (b)

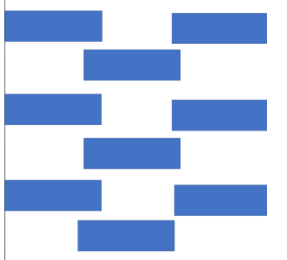
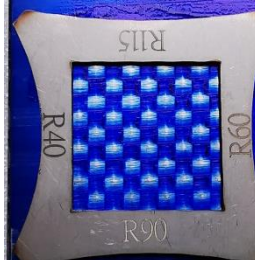
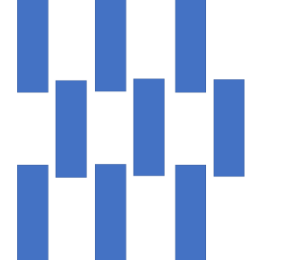
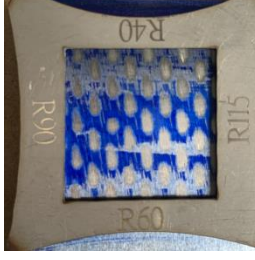
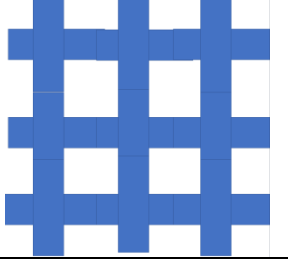
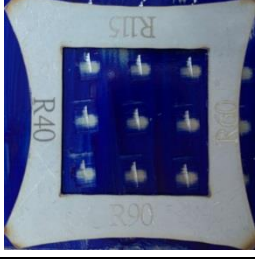
圖 40 鏟花路徑示意圖

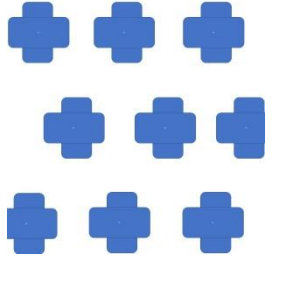

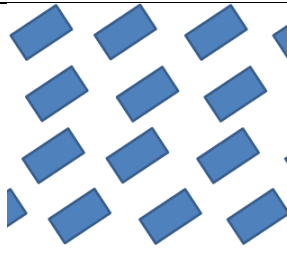

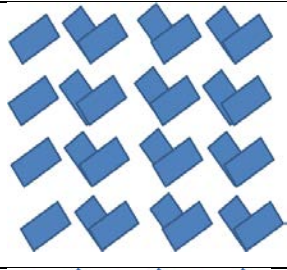

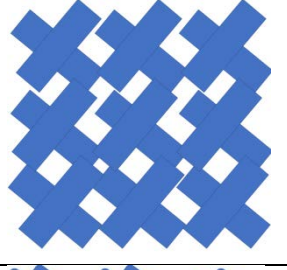

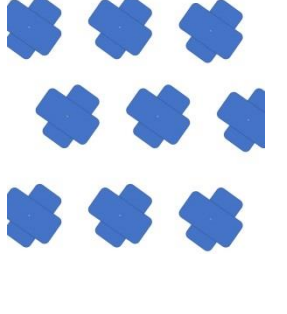

現今機械加工技術，在鏟花加工前的研磨製程的平面度可達到相當精密的等級，再者自動鏟花機具有相當精準的定位功能，所以我們想使用特定的鏟花承

斑方向、承斑位置、承斑分佈這三個參數來縮短鏟花時間及鏟花次數，同時鏟花後的結果檢測也可達到要求。在實機測試前，我們使用鏟花承斑影像疊加的方式來預測鏟花結果工件高點位置。

如表 4 (a) 所示是不同鏟花承斑方向及分佈組合的影像示意，白色的部分即為預測的高點分佈，我們分別使用了幾個鏟花承斑影像去疊加，找出最佳的高點分佈後，確定這些鏟花承斑影像的方向及控制器介面參數，把參數輸入控制器的介面參數設定內，再使用自動鏟花機進行鏟花工作，結果如表 4 (b) 所示。再者我們為了測試具有角度旋轉承斑之功能鏟花，所以鏟花頭設計有角度旋轉之功能，旋轉刀頭即可以鏟出具有角度旋轉之鏟花承斑，使鏟花承斑組合可以多樣化。鏟花頭經校正後，即旋轉頭機構以鏟花刀頭為旋轉中心，並可以鏟出各種角度及不同排列之鏟花承斑，經過八種測試後，我們比較出不同鏟花承斑之高點的排列效果，下表是具有角度及奇偶數行交錯承斑分布功能之鏟花。

表 4. 鏟花承斑方向及分佈的影像及實圖

編號及承斑組合	鏟花承斑樣態示意圖(a)	自動鏟花實驗結果(b)	介面參數 Xgap Ygap Xshift angle
1 水平承斑 及奇偶數 行交錯			Xmin=0 Ymin=0 Xgap=0 Ygap =0 Xshift=3 Angle=0
2 垂直承斑 及奇偶數 行交錯			Xmin=0 Ymin=0 Xgap=0 Ygap =0 Xshift=3 Angle=90
3 水平+垂 直承斑			Xmin=0 Ymin=0 Xgap=0 Ygap =0 Xshift=0 Angle=90 , 0

<p>4 水平+垂直 直承斑及 奇偶數行 交錯</p>			<p>Xmin=0 Ymin=0 Xgap=0 Ygap =3 Xshift=3 Angle=90 , 0</p>	
<p>5 承斑 30 度及奇偶 數行交錯</p>			<p>Xmin=0 Ymin=0 Xgap=0 Ygap =3 Xshift=3 Angle=30</p>	
<p>6 承斑奇偶 數行為正 負 30 度</p>			<p>Xmin=0 Ymin=0 Xgap=0 Ygap =3 Xshift=0 Angle=30</p>	<p>Xmin=-7 Ymin=0 Xgap=0 Ygap =3 Xshift=0 Angle=120</p>
<p>7 正負 30 度交叉承 斑</p>			<p>Xmin=0 Ymin=0 Xgap=0 Ygap =3 Xshift=0 Angle=30</p>	<p>Xmin=-3 Ymin=-3 Xgap=0 Ygap =3 Xshift=0 Angle=120</p>
<p>8 正負 30 度交叉承 斑及奇偶 數行交錯</p>			<p>Xmin=0 Ymin=0 Xgap=0 Ygap =3 Xshift=3 Angle=30</p>	<p>Xmin=-2 Ymin=-3 Xgap=0 Ygap =3 Xshift=3 Angle=120</p>

七、全平面自動鏟花及高點數之比較

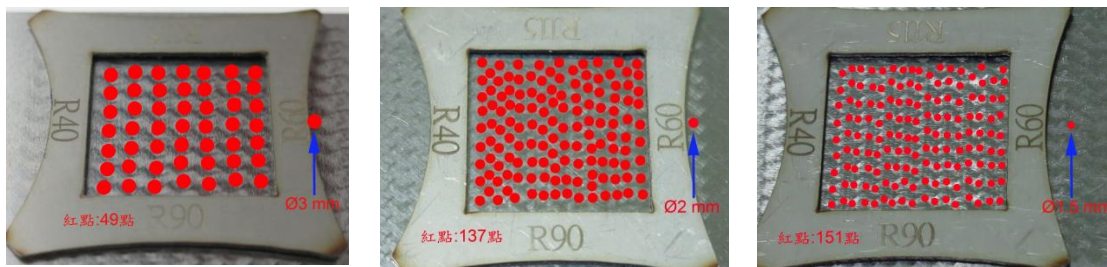
在鏟花承斑分布中，相同面積下我們分別做了三種不同密度的鏟花承斑，從圖 41 中可以發現，當承斑分布的越密集時，高點就會越多，反之，當鏟花承斑越分散時，高點就顯得比較少，高點多摩擦損耗相對會減少，品質就越高，經過了三種測試後，比較出不同密度鏟花承斑高點的效果。



(a)一次全平面鏟花 (b)重複二次全平面鏟花
(x、y 軸偏移) (c)重複三次全平面鏟花
(x、y 軸偏移)

圖 41 全平面自動鏟花

在自動鏟花結束後，實際數了三個相同面積(一英寸×一英寸)的高點數，我們發現重複鏟越多次，高點的數量就越多，如圖 42 所示(紅點即為高點)，在一次平面鏟花之下，就可以看出高點已經高達 49 點，遠遠超出人工鏟花品質標準的最高等級，鏟花之高點經測量結果，符合機器自動化的要求。



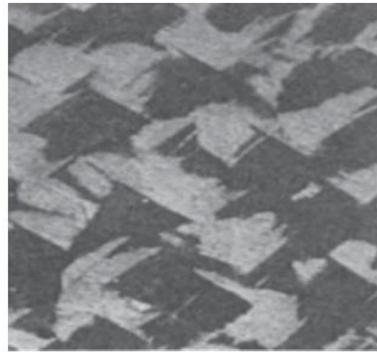
一次平面鏟花之高點 重複二次平面鏟花之 重複三次平面鏟花之
(一英寸×一英寸) 高點(一英寸×一英寸) 高點(一英寸×一英寸)

圖 42 平面鏟花之高點(一英寸×一英寸)

伍、討論

一、 自動化鏟花承斑和手工鏟花承斑比較

鏟花承斑形態是否和傳統鏟花承斑一樣具有儲油功能是一個自動鏟花能否取代人工鏟花的一個指標，我們使用顯微鏡去放大承斑觀察，自動化鏟花承斑及手工鏟花承斑的比較圖如圖 43 所示，由文獻可知手工鏟花鏟出來的承斑為一凹痕的痕跡，此痕跡在鏟花配合面作為具有潤滑功能之油袋。我們自動鏟花鏟完的工件使用顯微鏡來看，我們可以看出鏟花承斑具有表面凹凸的現象（照明光源有散射），跟手工鏟花相同，因此我們的自動化鏟花機所產出的鏟花承斑和手工鏟花承斑一樣具有油袋功能。



(a) 自動化鏟花承斑(綠色為顯微鏡表面光源，倍率 20X) (b) 手工鏟花鏟花承斑(參考文獻)[5]

圖 43 自動化鏟花承斑及手工鏟花承斑比較圖

二、 鏟花承斑標準比較

業界對於鏟花結果的標準是以鏟花承斑的分布狀況的量測參數來決定，第一為 PPI 值為每平方英寸高點數，第二為每平方英寸接觸率(每平方英寸高點和理想平面接觸的百分比)，其 PPI 值為 20P，高點接觸率由左到右為百分之 3.1 到百分之 70。

在鏟花平面上，高點功能為承接荷重的點，低點功能則為油袋，品質上高點越多品質就越高，相對每個點承受的重量會均衡分布，磨損情況也會緩慢許多。每平方英寸高點數與每平方英寸接觸率是鏟花技術的重要參數，因此鏟花師傅再加工完表面時，都會檢查表面上承接面積計算平均的 PPI 數，根據[5]的規範，PPI 數越少，表面也會越平坦，相對會造成油袋減少、摩擦力也會變大。在業界的規範接觸率 20PPI、高點接觸率百分之 10 已經是精密機械表面，本研

究也是採用此規範。經由上述的一些機構設計及實驗後，我們發現自動鏟花機可達到每平方英吋高點數 22 到 30 的超精密鏟花面，且能輕易由控制器的參數設定，執行自動鏟花，來達到表 1 所示的傳統人工鏟花標準。

陸、結論

我們從概念發想，自動鏟花核心機構設計，XY 平台機構設計，零件製作，控制器電路設計，最後完成了一部機台，經過多次的實驗測試，進一步達成當初所設定的目標，並做了實驗，証實二維複合式凸輪機構用於自動鏟花的可能性。我們把二維複合式凸輪自動鏟花機和手工鏟花(本校技藝競賽選手)分別做了以下幾點比較:

比較項目	二維複合式凸輪自動鏟花機	傳統手工鏟花
鏟花工作者技術要求	無經驗可	從學徒到師傅需歷經 3 年[9]
鏟花工作者職業傷害	無	極大
鏟花承斑形狀穩定度	高	低
相同面積鏟花時間	短	長
工作內容	操控控制面板	重複性高
鏟花承斑形狀	多樣化	形狀隨機
人工成本	低，機器運作	高，耗費體力及工時

經過上述說明得到以下的結論:

- 1、 3D 列印控制電路系統加上樹莓派和 python 可以實現自動鏟花機上的運動控制，並達到自動鏟花的功能。
- 2、 實現二維複合式凸輪機構來實現鏟花刀的鏟花路徑，並與四連桿機構比較過後，發現複合式凸輪修改彈性較大，在製造上也比較方便。

- 3、使用複合式凸輪所產生的路徑，執行自動鏟花結果和手工鏟花一樣能使機械接觸面具有油袋之功能
- 4、鏟花承斑能達到業界標準鏟花品質 20PPI 的接觸率
- 5、自動鏟花承斑分布具有規律分布，根據我們的需求可達到手工鏟花無法達到的需求

柒、參考資料及其他

- [1]賴承佑(2014)。數控工具機設計與製造技術發展趨勢-機械資訊 4 月刊。
- [2]<https://www.sunchintex.com.tw/ksh-series.html>
- [3]<http://www.kinik.com.tw/zh-tw/Products/CMPDiamondDisk.html>
- [4]<2020101317283811.pdf> (shs.edu.tw)
- [5]機械與機電工程研究所碩士論文-鏟花工件表面鏟花技術開發。雲林縣國立虎尾科技大學
- [6]自動鏟花系統之研究與開發。國立清華大學
- [7]榕鋒精密有限公司 (longforward.com.tw)
- [8]StefanGotteswinter.Scraping basics - Scraping flat - Part 1.Retrieved from [https://youtu.be/QJXqHpSh3SE?t=1081\(20210914\)](https://youtu.be/QJXqHpSh3SE?t=1081(20210914)).
- [9] <https://style.yahoo.com.tw/鏟花工藝-感測器-培訓傳承下-代-113456724.html>

【評語】 052313

1. 工具機產業鏟花主要還是以人工的方式來進行，是一項高度技術性的工作，研究嘗試開發自動鏟花的機台來取代人工，具挑戰性及重要性。
2. 對於鏟花的技術內容有充分了解，研究過程及方法說明清楚，包含實現鏟花的刀軌跡運動的驅動機構設計及鏟刀的製作及由樹莓派來控制鏟花刀轉向機構及鏟花刀驅動機構所需的機械動作，來達成具有不同角度及分布的鏟花承斑，並實際進行自動鏟花實驗，驗證是否符合要求，值得肯定。
3. 這個作品用複合凸輪來發展自動鏟花機是頗具巧思的做法，文獻與市面上皆有電動鏟花機的產品，建議也可將作品的初期成果與這些產品的優缺點作個比較，將更能凸顯產品價值。另外本作品可以達到的最小鏟花尺寸或是圖樣的限制為何，也可一併討論。
4. 鏟花所需力道不小，如何完善調整下壓和前進的力道應有所說明。
5. 人工鏟花容易校正不同位置的力道輸出，自動化時如何保持工具和工件間精準的力道和軌跡，則需要小心著墨。

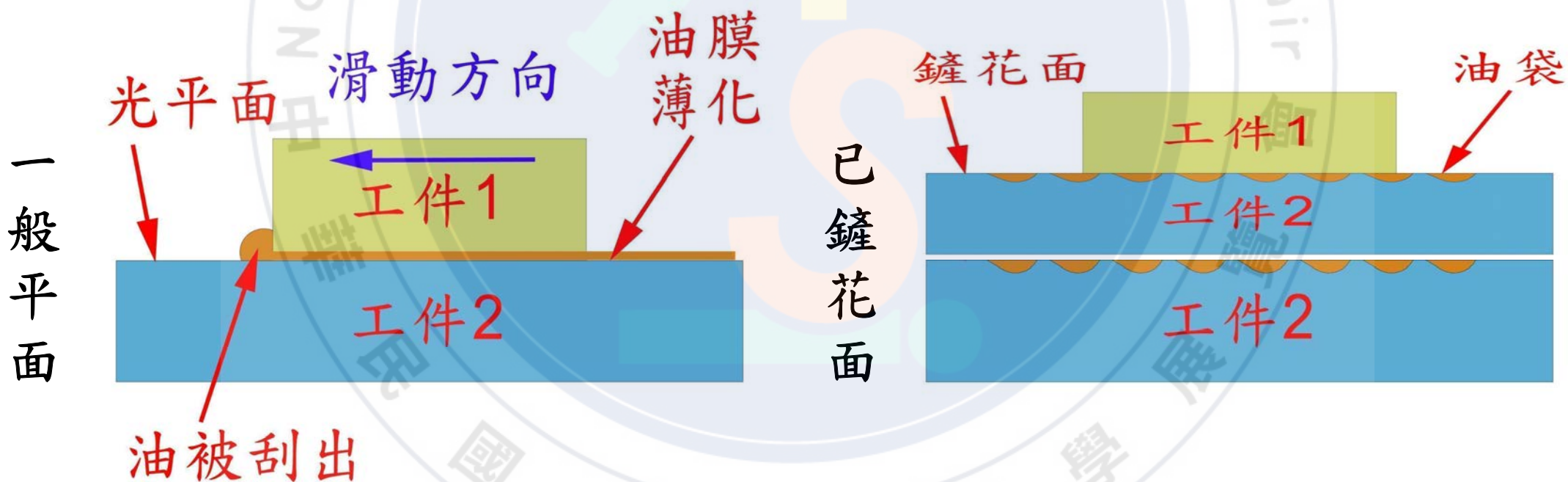
作品簡報

組別:高級中等學校組
科別:工程學科(一)
作品名稱:

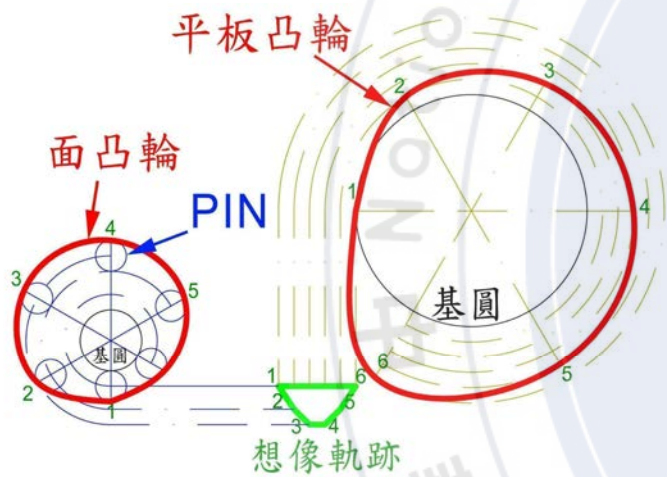
二維複合式凸輪於自動鏟花之研究

研究動機與目的

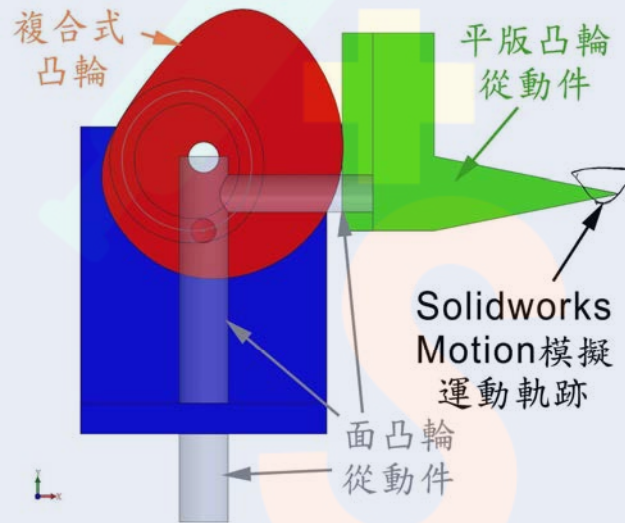
在機械產業當中，工具機組裝中的配合面都會運用到鏟花這項技術，佔有極為重要的位置，在一般精密平面如果沒有經過鏟花處理，當機件在滑動的過程當中，油會因為沒有地方留存，每一次滑動都會將表面的潤滑液刮出，使油膜不停薄化，最後會因為沒有油膜，使機件彼此磨擦損耗。



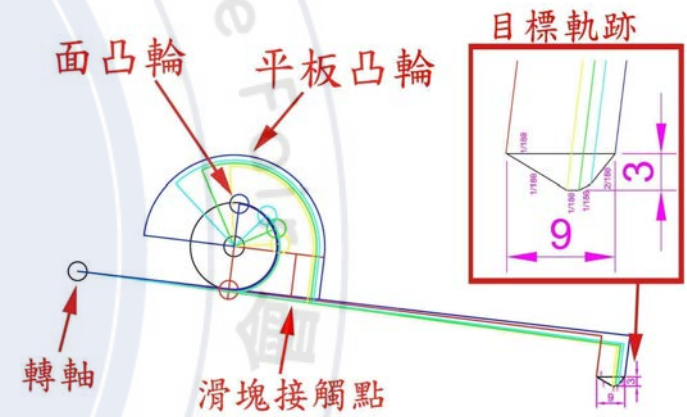
鏟花刀驅動機構-二維複合式凸輪設計過程



鏟花刀驅動機構



Solidworks Motion 模擬

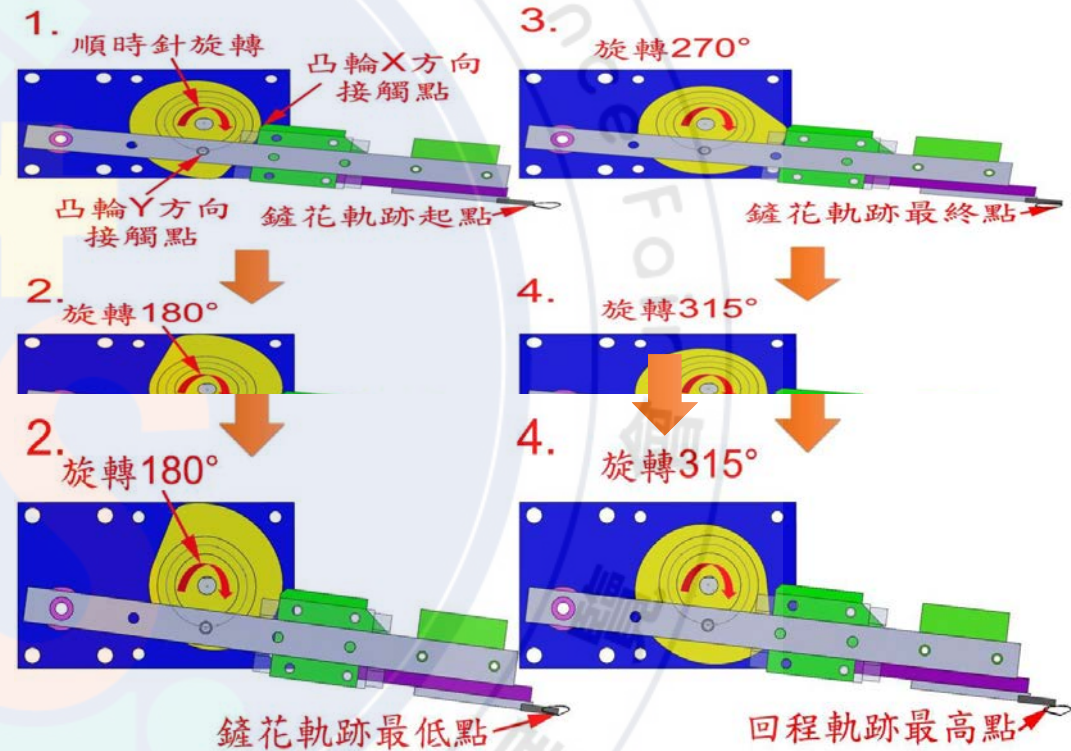


擺動二維複合式凸輪設計

擺動二維複合式凸輪設計

鏟花刀驅動機構-二維複合式凸輪作動設計

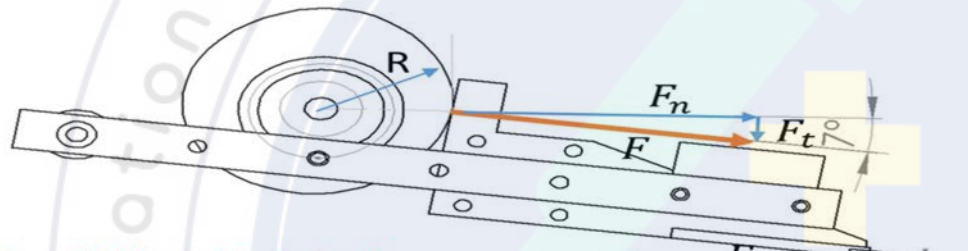
	凸輪1	凸輪2	凸輪3	凸輪4
凸輪外型				
鏟刀與軌跡				
模擬軌跡座標圖				
行程模擬軌跡座標圖				
行程時間(去:回)	1:1	1:1	2:1	3:1
測試結果	鏟花承斑不明顯	阻力太大無法驅動	測試結果良好	測試結果良好且時間縮短



二維複合式凸輪各種設計實驗圖

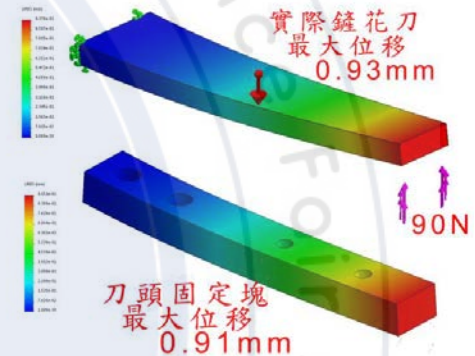
二維複合式凸輪作動圖

鏟花刀驅動機構-受力分析與設計

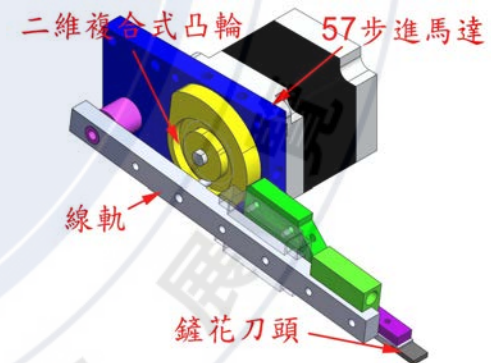


F : 鏟花刀所受阻力
 F_a : 實測鏟花壓力 (正向力)
 $F = F_a \div \sin 10^\circ$ (10° 鏟花刀水平夾角)
 F_t : 凸輪所受切線力量
 F : 鏟花刀所受阻力
 F_a : 實測鏟花壓力 (正向力)
 $F = F_a \div \sin 10^\circ$ (10° 鏟花刀水平夾角)
 F_t : 凸輪所受切線力量
 $F_t = F \times \sin 7^\circ$ (7° 凸輪壓力角)
 $T = F_t \times R$ (T 馬達扭力)
 因馬達 $T = 1.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 基圓 20mm 得到 $F_t = 90 \text{ N}$

作用力分析

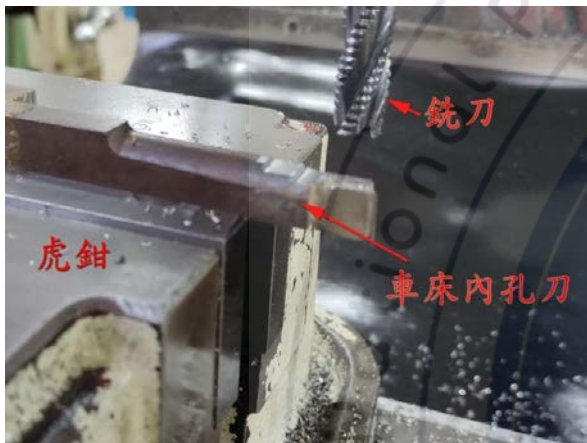


鏟花刀驅動機構

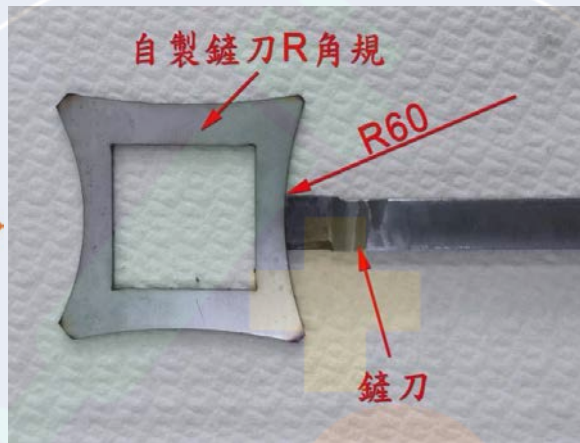


鏟花驅動機構設計

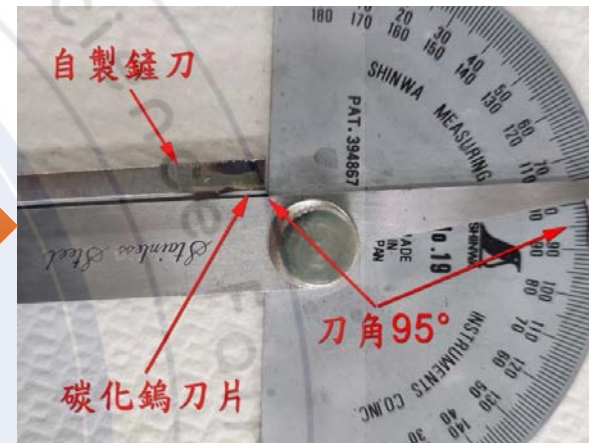
設計與加工過程



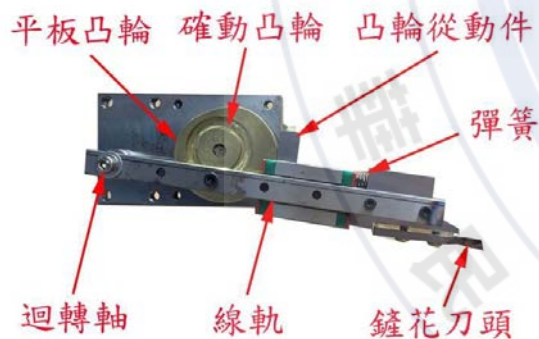
粗車刀銑成鏟花刀頭



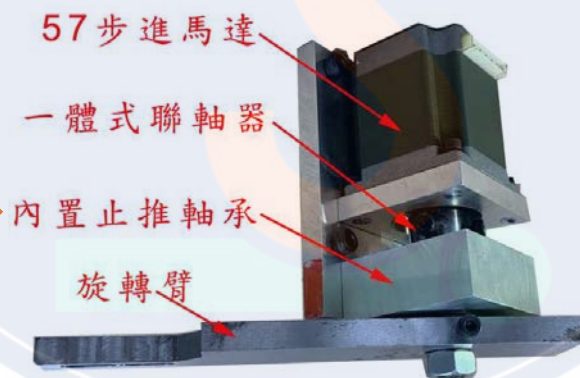
自製R角規檢驗鏟花刀



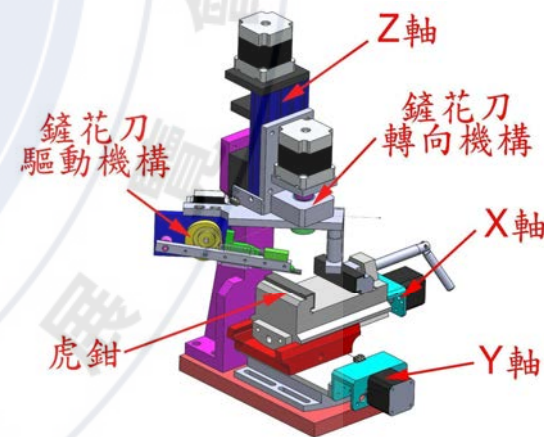
研磨鏟花刀95°斜角



自行加工
二維複合式凸輪機構

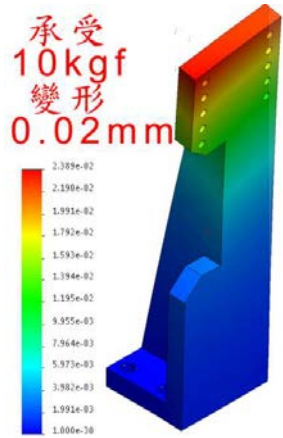


自行加工鏟花刀轉向機構

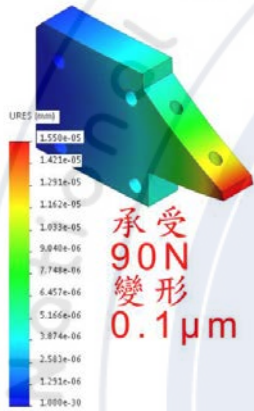


自動鏟花機組合設計

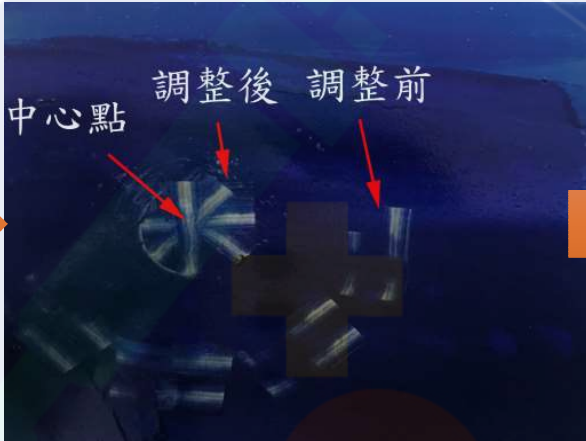
設計與校正



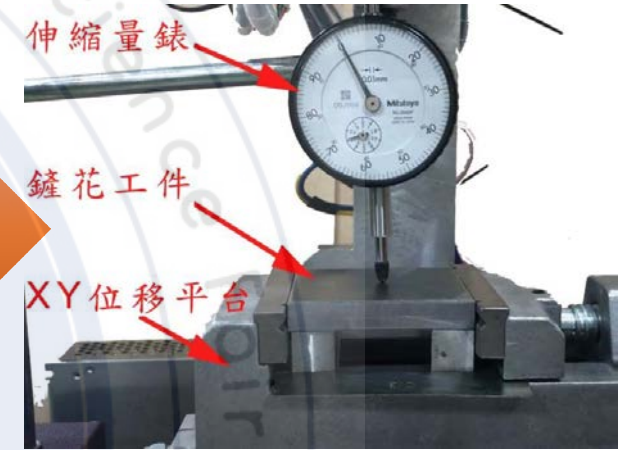
Solidworks simulation分析



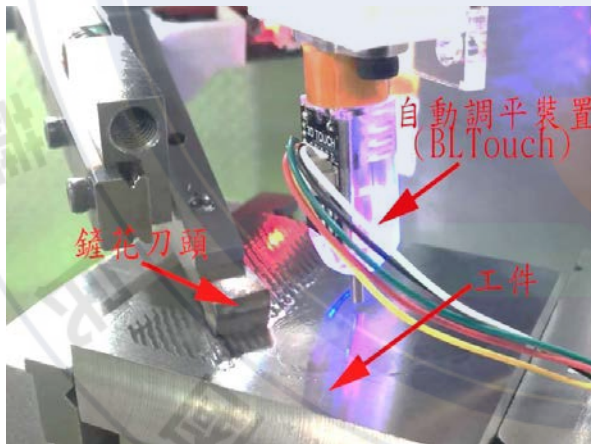
承受
90N
變形
0.1µm



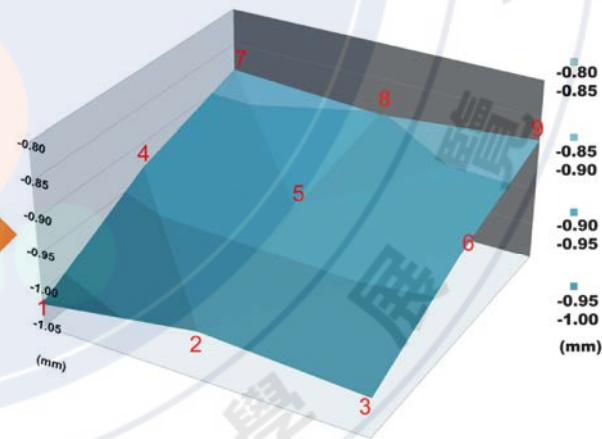
鏟花刀旋轉軸中心調整



平台平面度

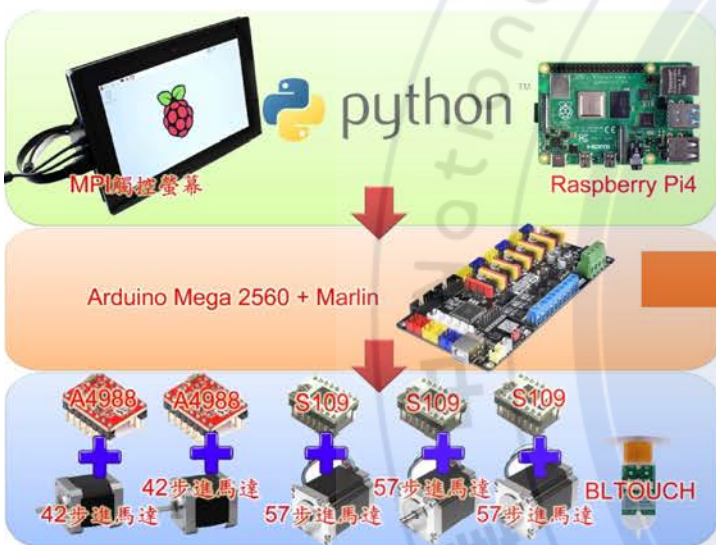


自動調平裝置

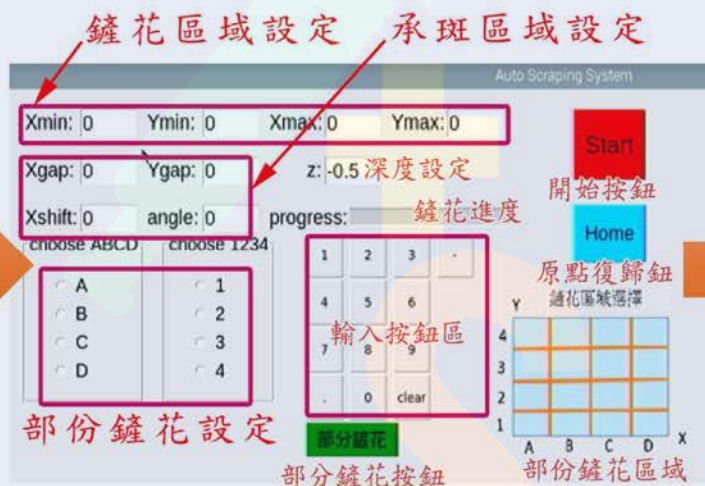


物體擺放傾斜時檢測

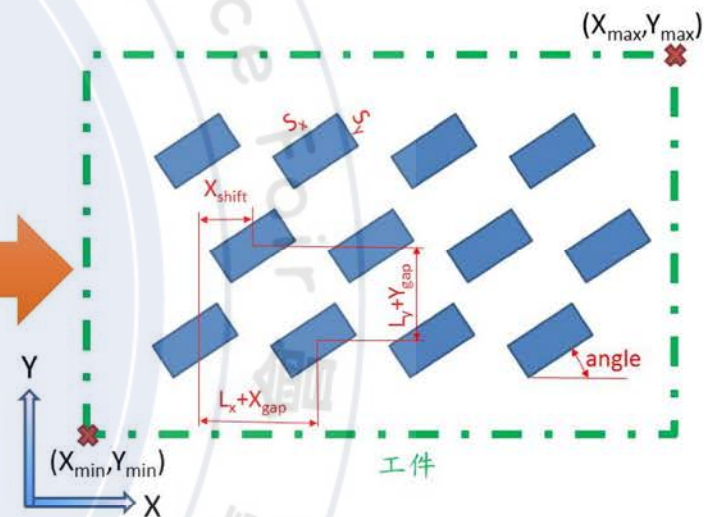
控制架構與操作介面



電路控制

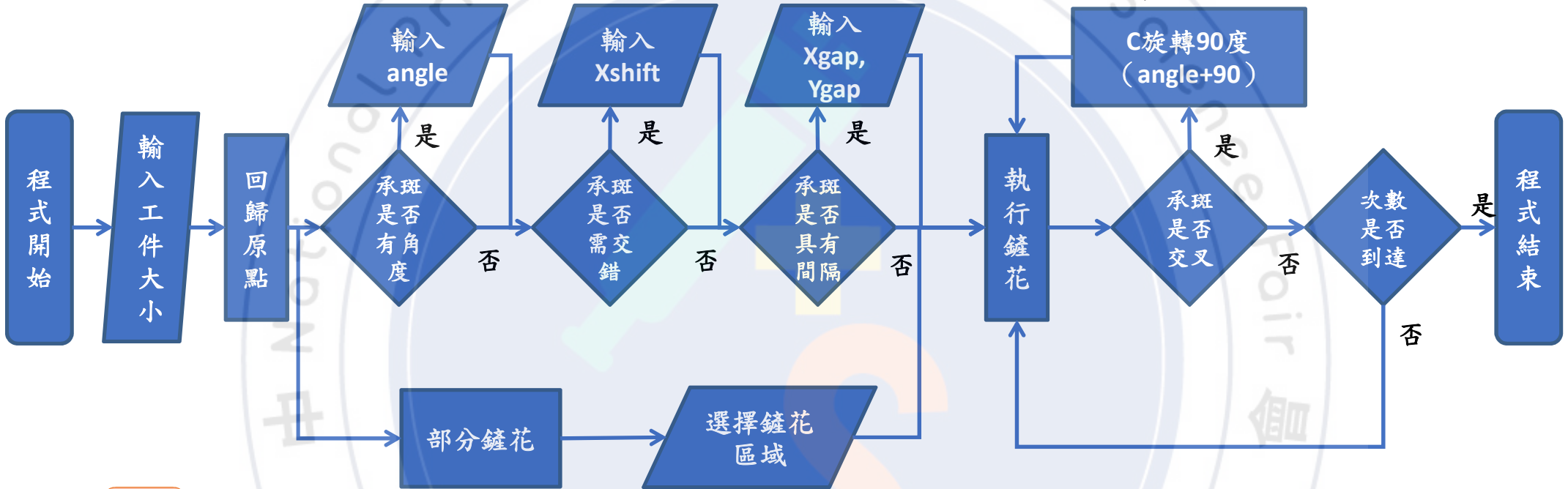


樹莓派操作介面

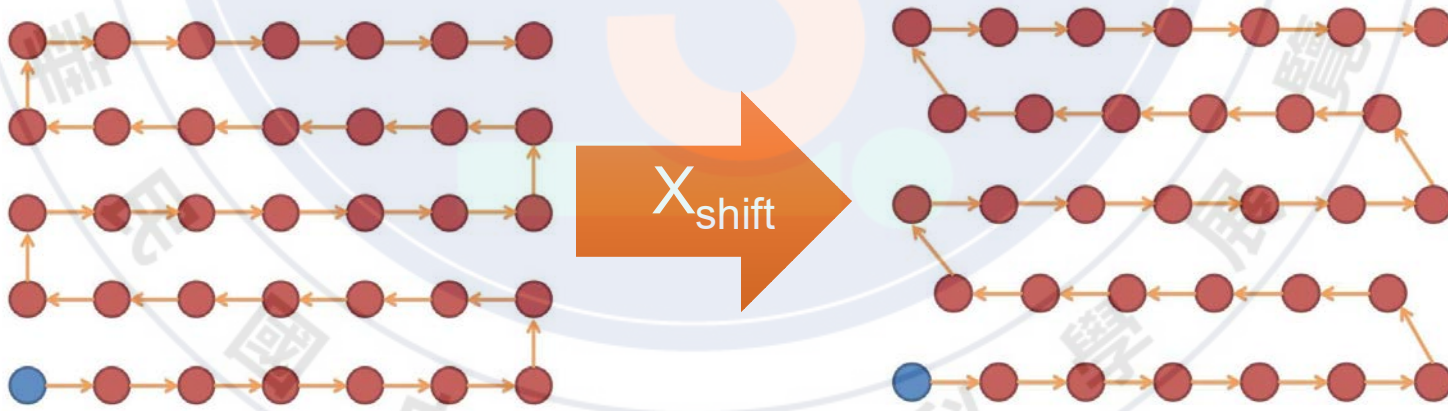


參數與鑄花承斑

程式流程與鏟花刀路規劃

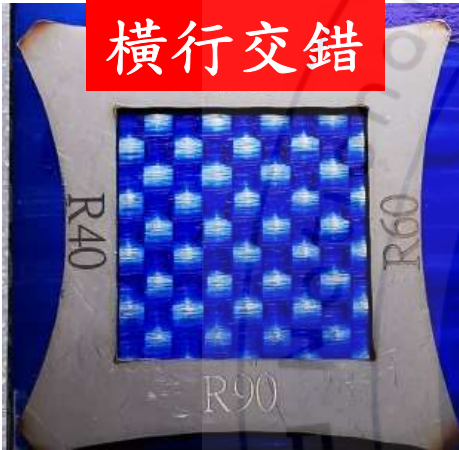


鏟花刀路規劃

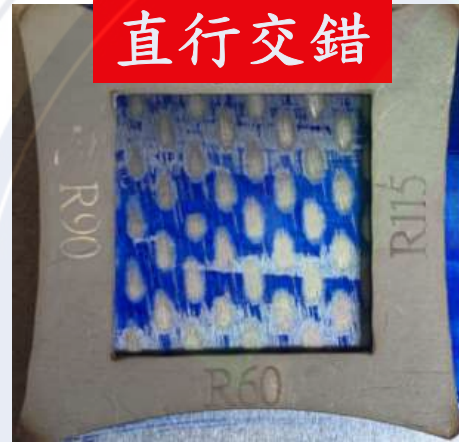


Python程式驗證

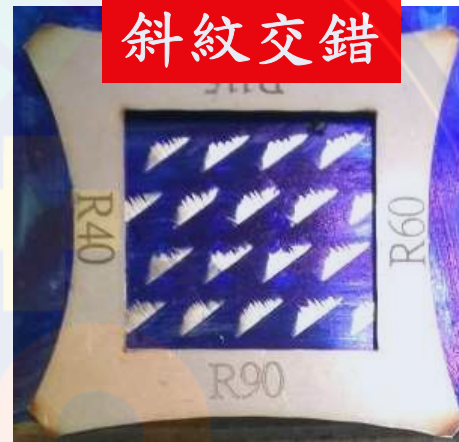
橫行交錯



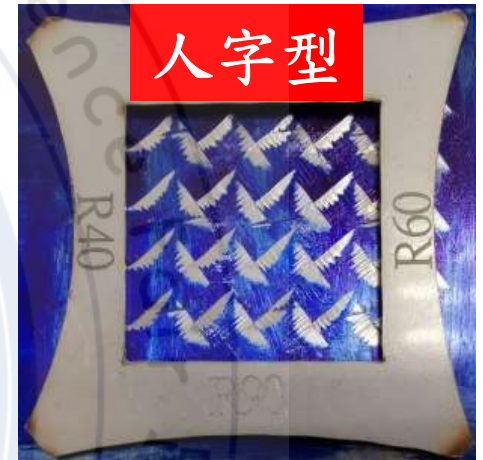
直行交錯



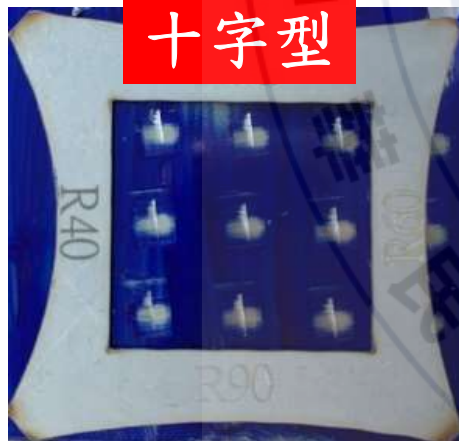
斜紋交錯



人字型



十字型



十字交錯



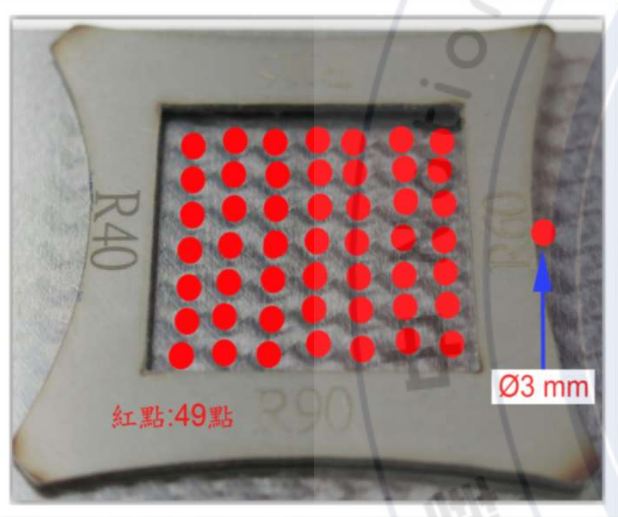
交叉型



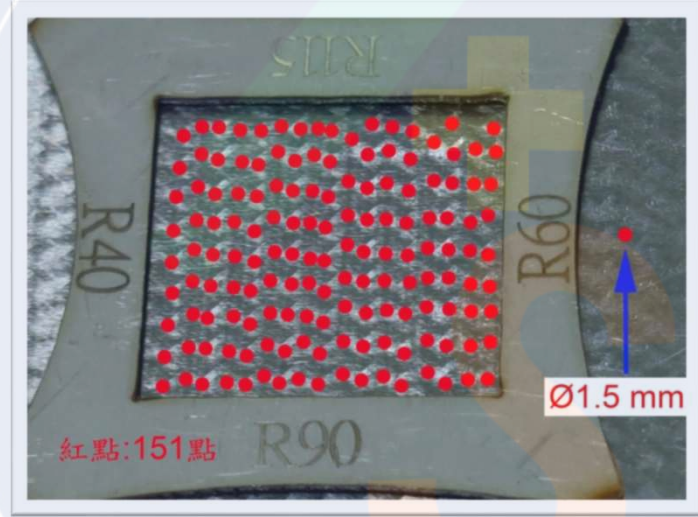
交叉型交錯



鏟花實驗-密度和高點



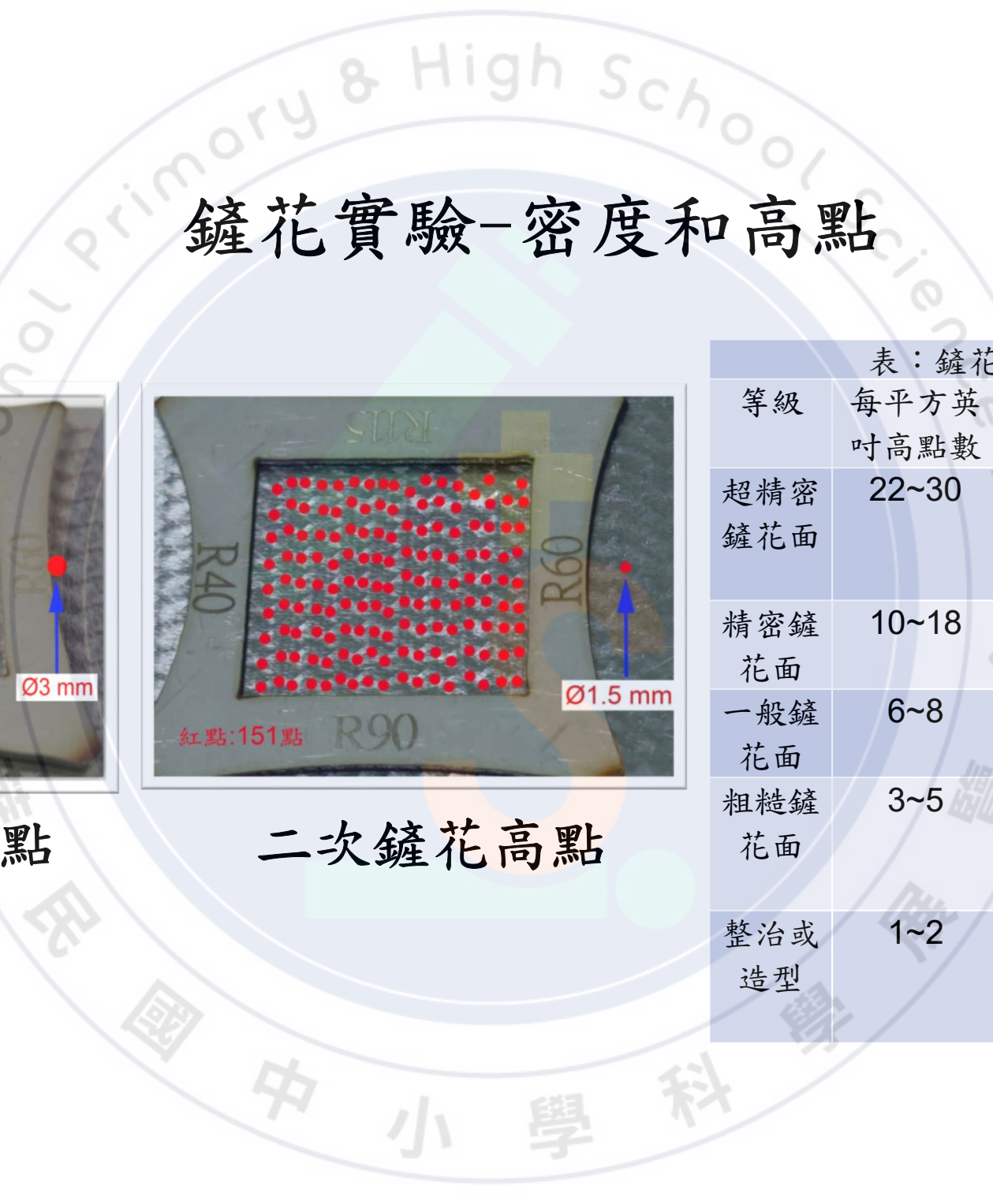
一次鏟花高點



二次鏟花高點

表：鏟花面品質標準[5]

等級	每平方英寸高點數	用途
超精密鏟花面	22~30	標準平板、標準平板治具、直規、其他超精密的表面
精密鏟花面	10~18	精密工具機導軌、精密表面
一般鏟花面	6~8	重型機器的寬大導軌面、需要栓合且油密的表面
粗糙鏟花面	3~5	粗糙或重型機器的導軌、大致吻合且需栓合的表面
整治或造型	1~2	大致吻合的表面且不要追求直角度或精確度的大型機器零件之配對



結論

	二維複合式凸輪自動鏟花機	傳統手工鏟花
鏟花工作者技術要求	無經驗可	從學徒到師傅需歷經3年
鏟花工作者職業傷害	無	極大
鏟花承斑形狀穩定度	高	低
相同面積鏟花時間	短	長
工作內容	操控控制面板	重複性高
鏟花承斑形狀	多樣化	形狀隨機
人工成本	低，機器運作	高，耗費體力及工時
適應性	低	高

1. 3D列印控制電路系統加上樹莓派和python可以實現自動鏟花機上的運動控制，並達到自動鏟花的功能。
2. 實現二維複合式凸輪機構來實現鏟花刀的鏟花路徑，並與四連桿機構比較過後，發現複合式凸輪修改彈性較大，在製造上也比較方便。
3. 使用複合式凸輪所產生的路徑，執行自動鏟花結果和手工鏟花一樣能使機械接觸面具有油袋之功能。
4. 鏟花承斑能達到業界標準鏟花品質20PPI的接觸率。

文獻探討

- [1]賴承佑(2014)。數控工具機設計與製造技術發展趨勢-機械資訊 4月刊。
- [2]<https://www.sunchintex.com.tw/ksh-series.html>
- [3]<http://www.kinik.com.tw/zh-tw/Products/CMPDiamondDisk.html>
- [4][2020101317283811.pdf \(shs.edu.tw\)](https://www.shs.edu.tw/2020101317283811.pdf)
- [5]機械與機電工程研究所碩士論文-鏟花工件表面鏟花技術開發。雲林縣國立虎尾科技大學
- [6]自動鏟花系統之研究與開發。國立清華大學
- [7] [榕鋒精密有限公司 \(longforward.com.tw\)](http://longforward.com.tw)
- [8]Stefan Gotteswinter.Scraping basics - Scraping flat - Part 1.Retrieved from [https://youtu.be/QJXqHpSh3SE?t=1081\(20210914\)](https://youtu.be/QJXqHpSh3SE?t=1081(20210914)).
- [9] <https://style.yahoo.com.tw/鏟花工藝-感測器-培訓傳承下-代-113456724.html>