

運用 3D 列印設計觸覺幾何繪圖模組

黃偉豪

高雄市立楠梓特殊學校

E-Mail: hurt@nzsmr.kh.edu.tw

一、前言

幾何學是一門高度依賴視覺空間認知的學科。對於無法依賴視覺學習的重度低視力或全盲學生而言，必須透過替代感官——主要是「觸覺」——來建構心理圖像。透過手指觸摸凸出的線條或材質差異，視障生能在大腦中逐步拼湊，最終形成對幾何圖形的完整認知。因此，如何提供精確且易於辨識的觸覺圖形，是視障幾何教育中的關鍵基礎。

然而，現有的觸覺圖形製作技術在普及性與即時性上仍面臨諸多挑戰。多行的點字觸摸顯示器（如 [Monarch](#)、[DotPad](#)）雖能即時呈現圖形，但受限於高昂造價與解析度，難以在基層學校大規模普及。而在靜態圖形製作上，點字圖形印表機（如 View Plus Rogue）或熱印機雖適合大量生產，但設備笨重且耗材成本高，無法滿足課堂中「隨時補充」或「個別化繪製」的即時需求。

在缺乏高階設備的基層教學現場，筆者最常使用的方式是成本較低的「橡皮板」搭配「點線器」。其原理是將紙張置於彈性橡皮板上，利用點線器滾過紙面，在背面形成凸起的觸覺線條。然而，此方法存在兩大實務困境：首先，圖形的「精確度」完全仰賴繪製者的手部穩定性，難以徒手畫出標準的幾何特徵；其次，橡皮板、點線器與其他工具為多件式組件，筆者身為巡迴輔導教師，需頻繁往返於不同學校間進行教學，整理這些零碎工具是一項負擔。

基於上述實務需求，本文提出一項運用 3D 列印技術的輔具設計發想。目標是開發一套「直覺易用」且「易於複製分享」的「觸覺幾何繪圖模組」。此設計的核心聚焦於「便攜性」與「低成本量產」，透過輕量化與整合性的設計，讓教師能輕鬆繪製出可觸摸的幾何圖形。

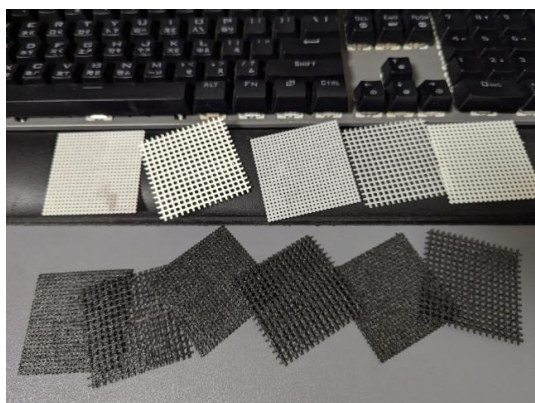
二、 設計理念與實作

（一） 初步嘗試：3D 列印網格板的開發與限制

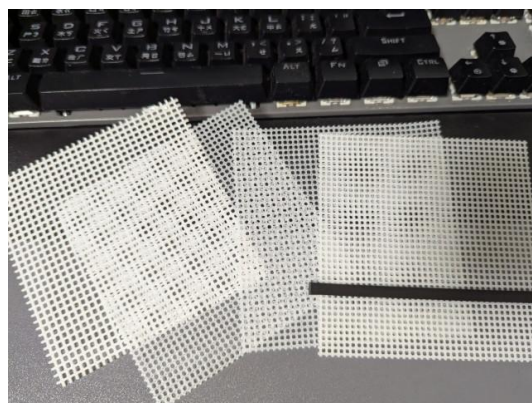
本文的設計發想，初期參考了其他視障教育工作者的實務經驗，有教師將紗窗網固定於硬底板上，鋪上紙張後以原子筆用力劃過，藉由紗網經緯線的凹凸紋理，讓筆尖在紙張上留下可觸摸的浮凸痕跡。基於此原理，本文嘗試利用 3D 列印技術製作更為堅固且規格化的「網格板」，以取代容易破損或鬆脫的紗網。

筆者運用 Tinkercad 3D 建模網站，繪製了多款不同參數的網格模型，變項包含網格的粗細（線徑）、孔隙間距（密度）以及板材的整體厚度。利用 FDM 3D 列印機印出多種材質（如 PLA、TPU）與規格的小尺寸樣品，並實際覆蓋紙張進行繪圖測試，以找出觸覺回饋最清晰的參數組合。

經反覆測試篩選出最佳參數後，進一步將模型放大面積進行試作。然而，在實際繪製幾何圖形時，卻發現了此結構存在重大的功能缺陷。由於網格板是由垂直與水平的經緯線交織而成，當筆尖沿著與網格平行（0 度或 90 度）的方向移動時，能順利壓出痕跡；但當繪製「斜線」或「圓弧」時，筆尖容易滑過網格的交叉點或無法準確落入孔隙中，導致紙張上留下的觸覺線條斷斷續續。此一結構性的限制，證實了單純模仿紗網結構的 3D 列印網格板，無法滿足複雜幾何作圖的需求。



圖一 不同參數的網格



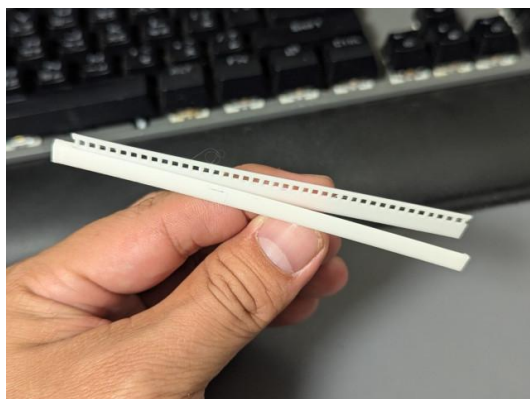
圖二 放大面積的網格

（二） 設計轉折：從「面」到「線」的模組化突破

面對網格板無法繪製任意角度斜線的結構性限制，筆者重新思考設計邏輯。既然固定的網格「面」會限制筆尖的路徑，不如將設計維度從二維的「面」濃縮為一維的「線」。

基於此概念，本研究開發出改良版的「長條狀觸覺繪圖夾」。此工具採用上下夾具設計，結構包含上下兩層：

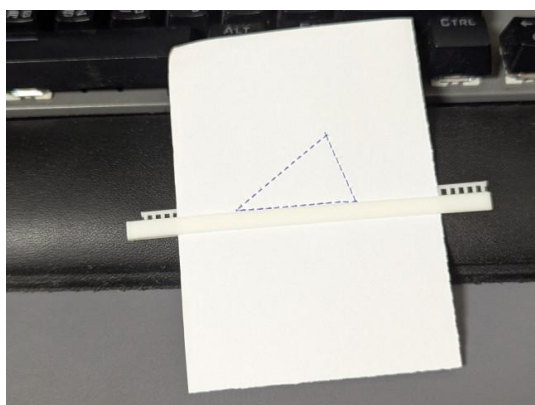
1. **底層：** 設計有一排連續的網格孔洞，作為筆尖下壓產生凸點的基座。
2. **上層：** 為長條狀導引板，用以限制筆尖的移動路徑，確保畫出的線條沿著網格孔洞移動。



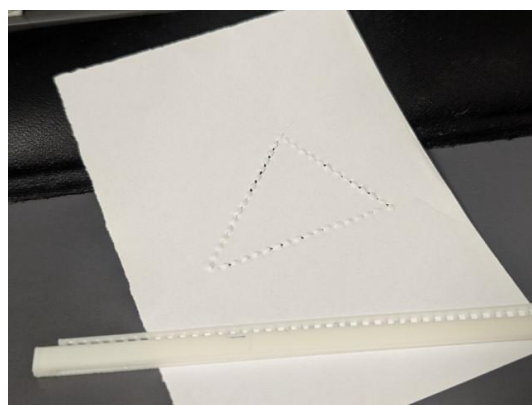
圖三 長條狀觸覺繪圖夾

此設計成功突破了「角度限制」。使用時，教學者只需將紙張放入夾層中，轉動紙夾或紙張至所需角度即可，無須改變運筆方式。當筆尖沿著上層導引板滑動時，會自然地落入底層的網格孔洞中，在紙張上壓出連續且均勻的觸覺凸痕。

實測結果顯示，此工具不僅能繪製出筆直的邊長，更能透過旋轉紙夾輕鬆完成三角形等任意角度的幾何圖形，達成了「功能精簡」與「操作優化」的雙重目標。



圖四 圖形繪製



圖五 繪製效果

（三） 結構優化與多版本開發

在確立了「長條狀繪圖夾」的可行性後，本研究進一步嘗試將工具尺寸延伸，以適應 A4 紙張的完整寬度。然而，在單純將模型「拉長」的測試中發現了物理上的

結構缺陷：當導引板長度增加但截面積不變時，材料的剛性顯著下降。在繪圖過程中，筆尖對導引板施加的側向壓力，會導致長條板身發生變形，使得線條繪製時無法沿著網格孔洞移動。

為了克服長跨距下的剛性不足問題，筆者調整了 CAD 模型，透過增加導引板的寬度來提升強度，確保即便在長距離跨度下，導引板仍能維持筆直不變形。經過反覆測試，最終開發出三種不同規格的版本(便攜型、加強型、加長型)，以滿足不同的教學場域需求。



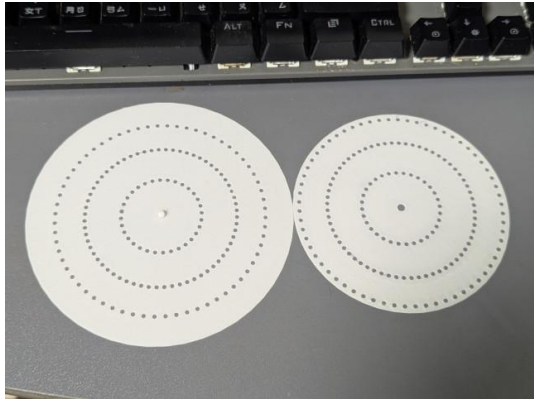
圖六（由左至右）加長型、測試版、加強型、便攜型

（四） 衍生應用：圓形繪圖模組

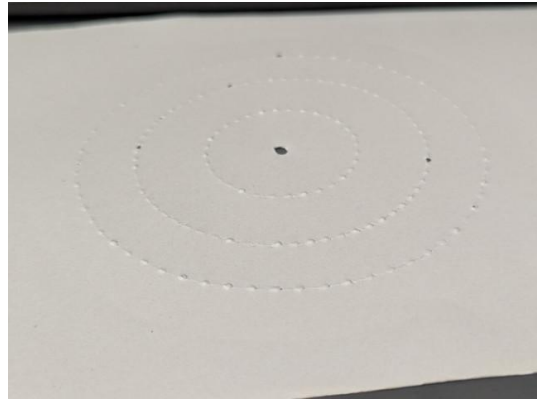
基於上述直線繪圖夾的成功經驗，筆者進一步將此「上下層導引結構」應用於圓形圖形的繪製，筆者設計之圓形繪圖模組包含兩個組件（如圖七所示）：

1. **底盤**：具有同心圓排列的網格孔洞，中心設有一凸出的定位軸。
2. **表盤**：對應底盤的孔洞位置設有導引孔。

操作時，利用底盤中心的定位軸穿透紙張，將底盤與表盤以上下夾擊的方式固定。使用者只需將筆尖插入表盤的孔洞中，順著軌道旋轉施壓，筆尖便會穿過紙張壓在底盤的網格上。此設計利用「同軸固定」原理，讓使用者能輕鬆畫出半徑固定、線條封閉且觸覺回饋清晰的同心圓，解決了圓形繪製的難題。



圖七 左為底盤，右為表盤



圖八 繪製效果

三、 結語

本設計發想源於視障巡迴教學的實務需求，透過 3D 列印技術可快速調整的特性，成功將傳統的網格板改良為「線條導引」與「圓形導引」兩大模組。這套工具突破了橡皮板製圖「高度依賴手感」的限制，為基層教學現場提供了一套輕便、高效的觸摸圖形製作工具解決方案。

延伸學習連結

操作影片：<https://youtu.be/StVWYT40HCw>