

A Comparison of Slicing-Tools for Fused Deposition Modeling 3D-printer

Jing-Hua Chen, Ying-Chih Lin*, Han Yuan Tan

Department of Applied Mathematics, Feng Chia University, No. 100,
Wenhwa Rd., Seatwen, Taichung 40724, Taiwan, R.O.C.

*yichlin@fcu.edu.tw

摘要

近幾年廣為人知的新興名詞「3D 列印」，轉眼間已經風靡了許多領域，不管是在軟體或硬體上，各式各樣的 3D 列印技術都不斷地推陳出新，且由近期國內外的資訊展與消費性電子展，不難看出 3D 列印機已漸漸成為一般消費性產品。雖然 3D 列印相關技術愈見成熟，但仍然有許多瓶頸與挑戰尚待克服，其中之一是列印件的外觀問題，這問題雖然能透過人工後製的方式來整修列印件，但往往難以完全清除乾淨，且在清除過程中也容易破壞列印件外觀的正常部份，更別提對複雜列印件的處理，更是曠時費日。因此，本論文針對影響列印件外觀常見的懸垂(overhang)及架橋(bridge)問題，分析各切層(slicing)工具軟體產生列印路徑的差異，接著透過調整列印參數來改善列印件的外觀，達到不需要人工後製的前提下，提升列印件的品質。

1. 前言

「3D 列印」是積層製造技術的俗稱。積層製造(Additive Manufacturing, AM)技術是依據 3D 電腦輔助設計(Computer Aided Design, CAD)軟體的協助，將 3D CAD 模型分切成薄層，進行將 3D 資料分解成 2D 資料的過程，依據分層的 2D 資料，針對性地採用製造方法製作與資料分層厚度相同的薄片，而每層薄片依序重疊起來，就組成了 3D 實體，實現從 2D 薄層疊加成 3D 實體物件的過程。由近期國內外的資訊展與消費性電子展，不難看出 3D 列印機已漸漸成為一般消費性產品，且相關技術也愈見成熟，但仍然有許多瓶頸與挑戰尚待克服。和傳統的減法製造方式相比，積層製造有著能客製化、複雜結構的快速製造等優勢，但也有製造速度比較慢、材料種類受限、列印件的精準度與完成度也不一致等缺陷。

圖一呈現透過 3D 列印來產生列印件的流

程，使用 3D 列印之前要先透過 CAD 軟體來建構 3D 物件的模型；再來需要能把 3D 物件切層的軟體，當塑膠從擠出頭出來後，3D 物件會以一次印一層的方式產生，所以我們需要能把建構好的 3D 物件切割成數個圖層並堆疊起來的工具軟體，而這個軟體會將每一個切割圖層轉換成特別的資料格式，稱為 G-Code，主要是用來告訴擠出頭要在哪裡把熔化後的塑料放下來。接著還需要一種專門的軟體來控制 3D 印表機的電路，如三個馬達 X-Y-Z 軸的移動、指示馬達軸心的轉動方向為何、擠出頭加熱到特定溫度後就開始熔化塑膠等工作，等一切準備就緒就可將模型層層打印完成。

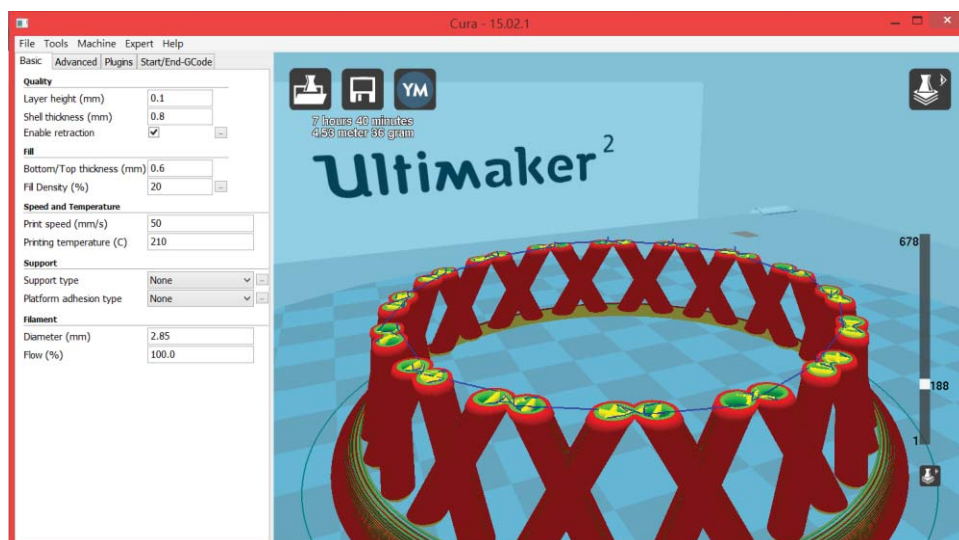
儘管 3D 列印相關技術愈見成熟，但在軟體上仍然有許多瓶頸與挑戰尚待克服。本論文從分析與比較現有的切層(slicing)工具軟體入手，比較不同切層工具所產生的列印路徑差異，在實際進行列印時會對於列印件造成甚麼不良的影響，如懸垂(overhang)及架橋(bridge)等問題。上述問題雖然都能透過人工後製的方式來整修列印件，但往往難以完全清除乾淨，且在清除過程中也容易破壞列印件外觀的正常部份，更別提對複雜列印件的處理，更是曠時費日，因此本論文也試圖找出合適的列印參數來改變列印行為，以便於在不需人工後製的前提下，提升列印件的品質。

2. 相關文獻

3D 模型檔在列印前必須經過加工處理，而所謂的切層(slicing)是將三維空間的模型以 z 軸水平切割，產生二維空間(xy-plane)的薄片，列印時再將這些二維空間的薄片逐層堆疊成三維空間的模型。針對切層有許多的切層工具以三維立體空間的模型做為輸入，經切層後輸出代碼以告訴列印機該如何運作，除此之外有些切層工具軟體也提供修改的功能，例如：調整模型比例、旋轉模型等，在產生代碼方面也能修



圖一：3D 列印流程圖



圖二：利用 Cura 進行切層與產生列印路徑

改，例如：列印速度、溫度等[1]。常見的切層軟體有 Cura、Slic3r、KISSlicer、RepSnapper、Skeinforge、Miracle-Grue 等，以下將介紹本研究計畫會使用到的四種切層工具 Cura、Skeinforge、Slic3r 以及 KISSlicer [2]，其中前三種的切層演算法都是開放性原始碼，對於分析、比較以及修改來說都相當方便。

- Cura：由 Ultimaker 開發，包含了列印和切層的功能，可以在 Linux、Window 和 Mac 平台上使用，可用的 3D 圖檔包括 STL、OBJ、DAE 以及 AMF 等。優點是切層處理時間快，方便使用的用戶介面，提供命令式(command)介面等；缺點則是列印的精準度較低。
- Skeinforge：為免費開源程式，支持的圖檔格式有 STL、GTS、OBJ、SVG、XML、GCODE 等，Skeinforge 比其他的切層工具更難安裝，最好的安裝方法為安裝包含此程式的軟體。優點是擁有許多參數設定，提供命令式介面；缺點則是操作介面複雜，切層速度較慢。
- Slice3r：能將 SLT、OBJ 和 AMF 圖檔生成 G-code，且也能在 Linux、Mac 和 Window 平台上使用，3D 列印軟體一般都會包含此切層工具。優點是列印精準度高，使用者介面容易使用，也提供命令式介面；缺點則是有列印時有對角線與結構問題。
- KISSlicer：這個不是開源軟體，分免費與專業兩種版本，從 STL 檔生成 G-Code，此軟體可在 FreeBSD、Linux、Mac 和 Window 平台上使用。優點是列印精準度高，缺點是一些預設的配置可能導致列印時的問題。

3. 切層方法

3.1. CuraEngine

CuraEngine 是切層軟體 Cura 用來切層並產生列印路徑的程式，這個引擎用 C++撰寫，能將輸入的 STL 檔經過切層處理，產生列印行為與路徑，最後輸出代碼(G-Code)以告訴控制板該如何移動列印機的擠出頭來進行列印。CuraEngine 的開放性使我們能輕易地添加或修改源代碼以實現我們在列印行為與路徑的想法[3]；此外，Cura 是用 Python 語言寫成，而透過 Cura 這個使用者介面(GUI)，除了能方便操作整個列印過程外，也能夠預先觀察到修改過後的切層方式及列印路徑是否能順利地完成列印件。Cura 最新的版本是 2015/2/19 釋出的 15.02，如圖二所示。

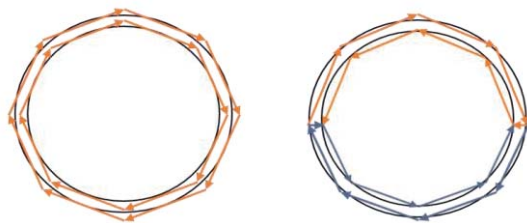
Cura 透過 CuraEngine 引擎來進行切層並產生列印路徑與最終的 G-Code，而因為開源的關係，我們得以下載 CuraEngine 原始碼來作分析與修改。CuraEngine 簡易的運作流程為：首先針對 z 軸作切層，取得與每一層切平面相交的封閉多邊形，再將這些多邊形排列一個列印的先後順序，之後再依預設的方式決定多邊形內部該如何進行列印。CuraEngine 將多邊形排列順序的問題模型化成計算機領域相當著名的旅行業務員問題(Traveling Salesman Problem, TSP)[4]，這個問題是說旅行業務員要到 n 個城市(點)推展業務，從某一個城市出發，經過每個城市恰好一次，再回到原出發點。城市間有路(邊)相連，而每一條路有旅行的成本(邊上的權重)，TSP 的問題為找出一個最小成本的路徑。

CuraEngine 將多邊形模型化成點，將多邊形間的路徑模型化成邊，而路徑的大小則成為邊上的權重，以此將多邊形排序的問題轉化成 TSP 的問題，然而 TSP 是個有名的計算難題，雖然有許多專家學者在鑽研，但到目前還沒有得出有效率的演算法。透過分析 CuraEngine 的

程式碼發現，它是採用貪婪的作法(Greedy method) [4]，也就是從任一個多邊形 i 出發，下一個則是與 i 距離最近且尚未拜訪過的多邊形，由此依序將多邊形排出拜訪的順序，在描繪出多邊形的輪廓後，接著才產生多邊形內部的列印路徑。

3.2. 列印路徑

隨著使用 3D 列印的經驗越來越多，發覺到在列印過程中擠出頭的移動方式（也就是所謂的列印路徑）不太自然，與一般畫圖所描繪的路徑不一樣。以圖三為例，在繪製圓形的外圍輪廓時，一般會用圖三(a)的畫法，以順或逆時針的方式繪製兩個圓圈；而 3D 列印的路徑則是如圖三(b)，會分兩個半圓的輪廓來列印。以此作為契機，比較了其他的切層與列印路徑產生工具，發現不同的工具所產生的列印路徑都不相同，即使在同一台機器上，不同列印路徑完成的列印件，其品質也都不盡相同，而且在列印件的品質上都會有輕重不等的瑕疵，例如邊緣突出、表面不平整等，嚴重影響列印件外觀。

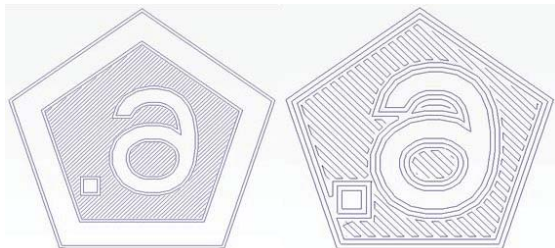


(a). 一般畫圖路徑 (b). 3D 列印的路徑

圖四：列印路徑

3.3. G-Code

G-Code 被分類為計算機數控程序(Computerized Numerical Control, CNC)中的語言，用來命令列印機執行動作，裡頭也包含 M-Code (Machine Code)、F-Code (Feed-rate Code) 操控其他方面[5]。此外，G-Code viewer 用來處理 G-Code 代碼並圖形化列印路徑，有網頁、單機軟體、App 等多種介面可供使用[2]，但網頁版有模型載入過慢、網頁不穩定等缺陷，所以採用單機版軟體來預覽我們產生的列印路徑是否有異樣的地方。本論文所採用的是 Repetier-Host 內建的 G-Code viewer [6]，用來做列印路徑圖像的觀看及比較（圖四）。



圖六： Repetier-Host 觀看列印路徑(左) Cura 生成路徑(右) Slic3r 生成路徑

4. 列印件常見問題

4.1. 架橋(bridge)問題

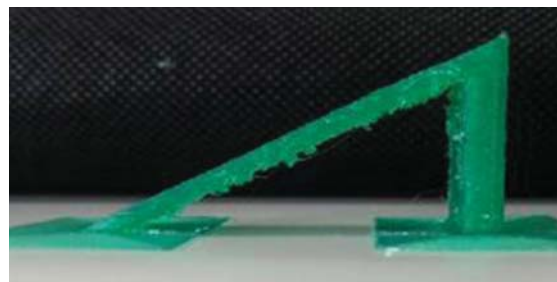
3D 模型上的水平懸空處如果沒有適度地使用支撐材(support)來做支撐點，在列印到懸空處時會因為重力的關係使得該層無法順利成形，因而產生如圖五般的下陷或甚至斷橋的情況，不僅嚴重影響列印件的外觀，造成結構的不穩定，也難以在後製的階段完全去除。



圖三：水平懸空處出現架橋問題

4.2. 懸垂(overhang)問題

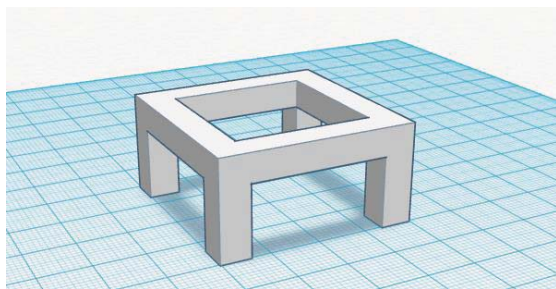
另一個常見的問題是懸垂，這指的是在 3D 模型外圍的斜邊，當傾斜角度過大時，列印時容易在下方懸空處產生許多懸垂的絲或凹凸不平，導致列印失敗，如圖六所示。



圖五：斜邊傾斜過大產生懸垂問題

5. 實驗測試

前述在列印時常見的懸垂及架橋問題，都會對列印件的外觀有嚴重的影響，輕忽這些問題勢必會大大降低列印品質，也會在後製階段耗費大量的人力與時間來加以修正。因此，我們首先針對先前提過的三個開源切層工具軟體做測試與比較，隨後再分析該如何針對性的調整列印參數，提高列印品質。再者，3D 列印機的參數種類琳瑯滿目，而這些參數控制細部的列印行為，對於列印成功與否扮演著關鍵性的角色。參數的種類繁多，且其項目也隨著不同的切層工具而異，這裡挑選兩個常出現在各列印機參數的選項，也就是「風扇」及「列印速度」。



圖八：鏤空立方體上半部模型

這裡所謂的「風扇」主要是指安裝於噴頭，作為定型之用，因為當塑料剛擠出時還是高溫熔融狀態，需經過風扇來加速冷卻凝固，以防止變形；而「列印速度」是指噴頭移動速度，在正常情況下移動速度越慢，列印件的結構會越穩固，但是在某些特殊的列印狀況（如懸空處）需要隨著調整速度，以維持列印件外觀的完整與平滑。

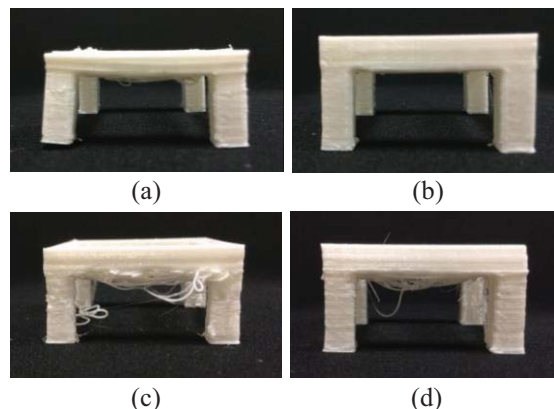
測試實驗使用三軸式的 3D 列印機— mini Kossel [7]，以三軸並聯、機械手臂式的方式控制列印噴頭。mini Kossel 採用熔融沉積成型 (Fused Deposition Modeling, FDM) 技術，利用噴頭把熱熔性材料（ABS 樹脂、尼龍、蠟等）加熱到臨界狀態，呈現半流體性質，在電腦控制下沿 CAD 確定的二維幾何資訊運動軌跡，噴頭將半流動狀態的材料擠壓出來，凝固形成輪廓形狀的薄層。當一層完畢後，透過層層堆疊的模式形成一個物件的 3D 實體[8]。

塑膠材料採用聚乳酸 (Poly Lactic Acid, PLA)。聚乳酸是由生物原料製造出來的，可被細菌分解不造成環境汙染，此外，聚乳酸本身熔點低使之成為 3D 列印的最佳材料[9]。PLA 塑料直徑為 1.75mm，溫度設定為攝氏 188 度。此外，常見開源的切層工具軟體有 Cura、Slic3r 及 Skeinforge，但我們僅採用前兩個來進行測試實驗。Skeinforge 因為在使用上有些設定問題（如定位用的 start g-code 等）且操作也較複雜，所以使用率不如 Cura 及 Slic3r 來高，因此排除作為實驗的對象。Slic3r 與 Cura 分別列印同一個模型但不同的參數設定，以便於比較與分析，接著再比較所產生的印路徑差異。層厚固定為 0.2mm，且噴嘴直徑大小為 0.5mm，實驗用的 3D 模型與測試如下。

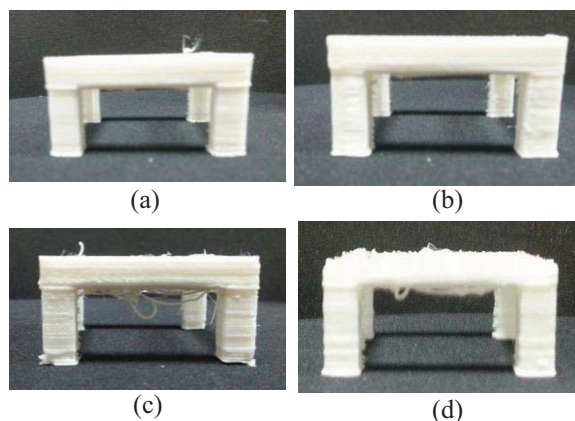
5.1. 鏤空立方體模型

首先針對架橋問題，採用如圖七的鏤空立方體模型，長度分別為 4×4×2cm，且每一個支柱的截面也都是長度為 0.5cm 的立方形。因為只凸顯架橋問題，所以僅取立方體的上半部來做列印測試，以節省時間與線材。

5.1.1. 列印參數與切層工具測試



圖七：使用 Cura 進行架橋問題的測試列印



圖九：使用 Slic3r 進行架橋問題的測試列印

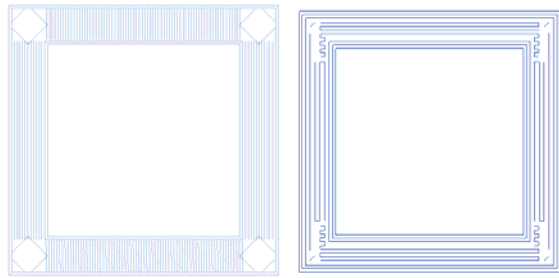
切層工具	風扇	速度	觀察 (圖八)
Cura	開啟	正常	(a)有些許下陷
	開啟	加速	(b)與其相較為成功
	關閉	正常	(c)幾乎無水平狀態
	關閉	加速	(d)下陷嚴重

切層工具	風扇	速度	觀察 (圖九)
Slic3r	開啟	正常	(a)較(b)微彎
	開啟	加速	(b)水平較為成功
	關閉	正常	(c)下陷非常嚴重
	關閉	加速	(d)有下陷

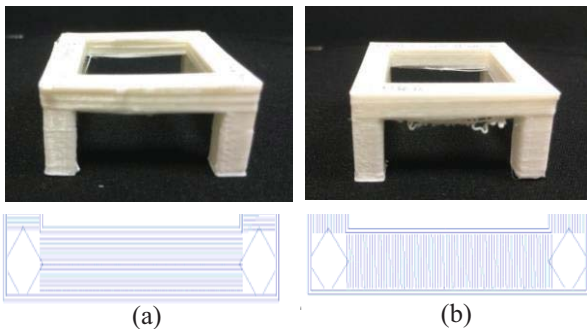
由上可得知，解決架橋問題需將列印速度加快與開啟風扇，讓列印過程中遇到架橋時能讓塑料迅速冷卻，完成搭橋的列印程序。然而，雖然三種切層工具都開啟風扇並加快列印速度，在改善架橋問題上的表現也不盡相同，由上圖可看出 Slic3r 開啟風扇就能完成搭橋(圖九(b))，與 Cura 相比沒有下陷的如此嚴重，Slic3r 在處理架橋問題相較 Cura 來的要好。

5.1.2. 列印路徑的比較

模型開始列印架橋的一層多數與輪廓呈現水平，如圖十二所示，作為搭橋使用。在比較中發現 Cura 的列印路徑，在架橋開始的一層與鄰近的路徑不一樣(圖十)，導致列印品質有所不同，架橋第一層對架橋問題影響甚大。且發



圖十二：分別使用(a) Cura 與(b) Slic3r 做切層的第 73 層列印路徑



圖十：列印件與其列印路徑

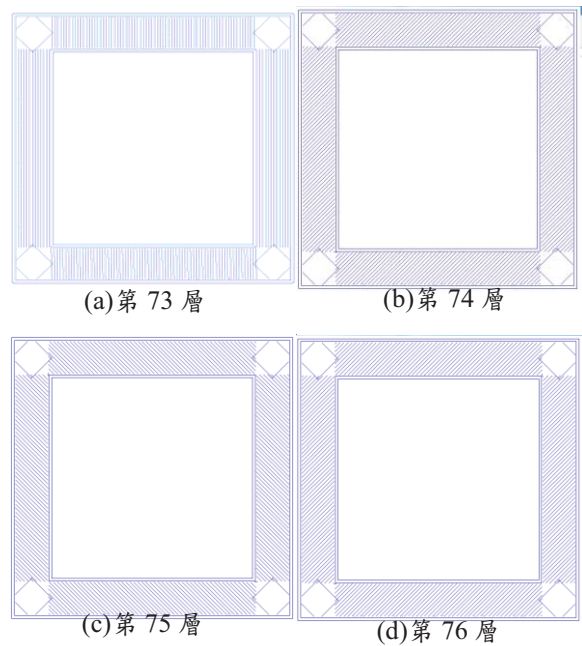
現所有切層工具的路徑分為外圍輪廓與內部填充，外圍輪廓指的是圖十二(b)方形最外圍與最內圍的邊，而外圍輪廓所形的封閉區間則稱為填充，在於填充部分的路徑相鄰的層會不同，例如：Cura 切層中，第 73 層（為架橋開始的一層）後 74 層與 75 層路徑不同，如圖十三所示，這樣疊起來形成交叉，目的是讓列印件的結構更加穩固。

5.2. 斜邊測試模型

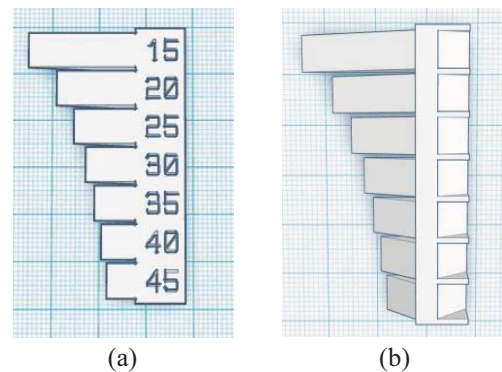
立體模型的外觀難免會有向外突出或傾斜的部份，若是向外傾斜超過列印時可容忍的程度，就容易在列印時發生坍塌的狀況。因此，這個實驗測試列印不同傾斜角度的模型，如圖十一所示，水平傾斜角度從 15 度開始，每次遞增 5 度，直到 45 度為止，共有七個不同的測試角度，以此觀察懸垂問題與傾斜角度的關係。圖十一(a)是測試模型的正面，標示著七個不同的傾斜角度；而圖十一(b)是模型的背面，用以觀察列印件上懸垂問題的嚴重性。

5.2.1. 列印參數與切層工具測試

切層工具	風扇	速度	觀察 (圖十六)
Cura	開啟	正常	(a)相較平滑完整
	開啟	加速	(b)比(a)略為粗糙
	關閉	正常	(c)懸垂多
	關閉	加速	(d)與(c)相較懸垂更多且與鄰邊相黏



圖十三：Cura 切層路徑



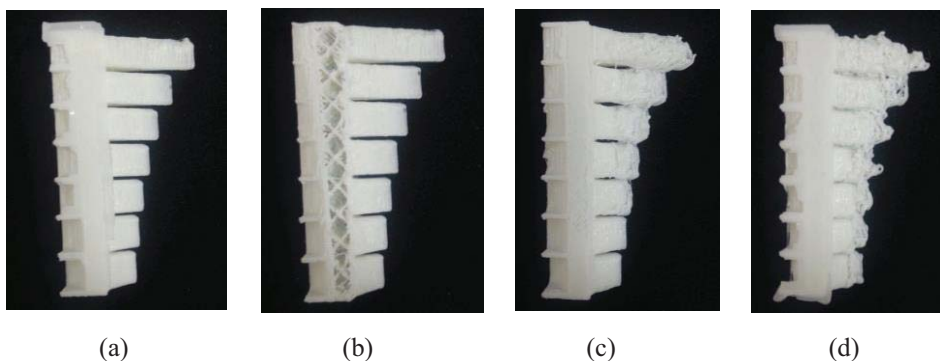
圖十一：角度測試模型

切層工具	風扇	速度	觀察 (圖十五)
Slic3r	開啟	正常	(a)與(b)相似
	開啟	加速	(b)相較平滑完整
	關閉	正常	(c)懸垂較為明顯
	關閉	加速	(d)30 度後開始懸垂

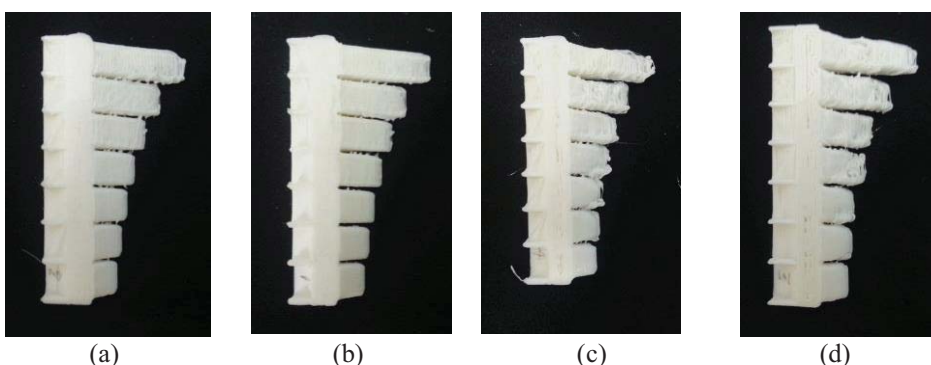
由上可得知，欲緩和懸垂問題可將列印速度減慢並開啟風扇，讓層與層在懸垂處相黏，且在列印過程中將風扇關閉會在邊緣處發生翹曲，影響到下一層導致列印失敗。而在這兩個切層工具的測試中，Cura 在前端的列印路徑產生變化使列印品質不同，參數設定好後較 Slic3r 列印的更加完整。水平傾斜角度最小可以到 20 度，如圖十六(a)的設定最為成功，但是到 15 度就有些許懸垂問題出現。

5.2.2. 列印路徑的比較

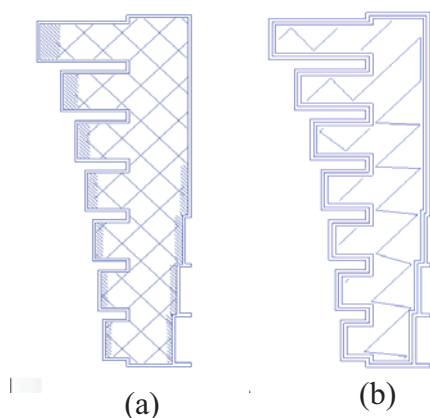
由圖十四(a)的前端處可知 Cura 在懸空處的路徑有經過特殊處理，在開啟的風扇速度減



圖十六：使用 Cura 進行懸垂問題的測試列印



圖十五：使用 Slic3r 進行懸垂問題的測試列印



圖十四：分別使用(a) Cura 與 (b) Slic3r 的做切層
的第 19 層列印路徑

慢的情況下，比 Slic3r 列印的較完整，可用以緩和懸垂問題。

6. 結論

消費等級的 3D 列印機已經逐漸普級，且相關的 3D 列印技術也愈見成熟，但在軟、硬體上仍然有許多尚待研究的課題。列印件外觀上的瑕疵能透過人工後製的方式來整修，但往往難以完全清除乾淨，且在清除過程中也容易破壞列印件的正常部份。透過本論文得知，可透過調整列印參數來提升列印品質，解決懸垂及架橋等在列印件上常見的問題，以節省在後製階

段所耗費的時間及人力成本。也得知列印路徑對列印件的影響甚大，未來研究可朝列印路徑著手，探討更改列印路徑以改善列印品質。

參考文獻

- [1] E. Aboufadel, S.V. Krawczyk and M. Sherman-Bennett, "3D Printing for Math Professors and Their Students," *Cornell University Library*, 2013.
- [2] H. Bugdayci, J. Grunert and F. Keller, "Analysis of Slicing-Tools for Fused Deposition Modeling 3D-Printers and Comparison of Different Printers," *Student Report Software Engineering FACH-0191*, 2014.
- [3] New open source slicer: CuraEngine, <https://github.com/Ultimaker>
- [4] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest and C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 3rd ed., The MIT Press, 2009.
- [5] A. Brown, D.D. Beer and P. Conradie, "Development of A Stereolithography (STL) Input and Computer Numerical Control (CNC) Output Algorithm for An Entry-Level 3-D Printer," *The South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 39-47, 2014.
- [6] Repetier Software, <http://www.repetier.com/>
- [7] Mini Kossel, <http://deltabot.tumblr.com/>

- [8] Stratasys-FDM technology,
<http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>
- [9] 陳士凱，程晨，杜洋，王正等，《3D 列印大未來》，碁峰資訊，2014 年 09 月