

自動調力之光固化3D列印機器開發

電話：08-7703202 # 7012

E-mail：cjyang@mail.npust.edu.tw

一、源起 / Introduction

增量製造(Additive Manufacturing)，又名3D列印，是一種列印三維物體的過程。此過程是透過電腦來控制機器，層層堆疊增加原有的成形層，直到完成所設計的物體。3D列印的過程可從建構物體的三維模型開始，透過電腦軟體規劃建構物體每一層的列印範圍和路徑，最後再由選定的堆疊技術來完成製作。近年來，經濟學人日報已將3D列印技術納入工業第三波革命中的一項重要技術，與物聯網、人工智慧和生物技術等同重視[1]。目前常見3D列印技術的應用端，可於產品打樣、藝文創作，甚至應用在汽車、航空跟醫療產業[2]。

常作為3D列印的材料有塑膠、聚合物、樹脂跟金屬，而對應的成型技術則有：「熔融沉積成型技術」、「立體光刻成型技術」、「噴墨列印技術」、「選擇性雷射燒結」與「電子束雷射燒結」等[3]。目前消費市場暢銷的主流為中低價格的熔融沉積成型技術機器，列印材料成本低廉，但噴頭易阻塞和成型品表面粗糙成為此技術的缺點。若考量以上的情況，立體光刻成型技術機台就更為合適，因為此技術的優點為成型品有較高的機械強度並且能達到較高的精密度。立體光刻成型技術可分成立體平版印刷(Stereo Lithography, SL)跟數位光處理(Digital Light Processing, DLP)兩種，共同點為兩者皆採用曝光成型方式。SLA的曝照方法是藉由雷射點光源照射，而DLP方法則是面光源。DLP的表面精細度雖較SLA點光源差，但加工所需時間較短，且列印尺寸範圍不受光源路徑影響，其發展潛力較大。立體光刻技術機器中共有上照成型與下照成型兩種方法。上照式的成型過程中移動物件平台會下移，使得溶液堆積在已成型的表面上。而光源下照式，其光源則在溶液池的下方，物件移動平台則浸泡在溶液池的上方，當物件成形時會黏在溶液池底部，再由平台上移時的拉伸力做分離動作，曝光後的物件會隨平台上移[4]。

目前，bottom-up製程中有個重要的議題，就是關於使成形物件從溶液池脫離的行為。若脫離力太大，會使模型斷裂造成列印失敗；若脫離力太小，反而使模型無法脫離溶液池而造成不正常材料堆積，喪失列印的精度而失敗。現在已有不同技術針對脫離問題進行改善，但還沒有一個完善的解決方式 [5-6]。本文將先探討DLP上照式機台列印過程中成形物脫離所承受到的脫離力，透過接觸面建構的二維模型來分析不同條件狀況下的脫離力，從力學分析結果進行機器成形物脫離機構的新設計，並透過測試來驗證新機器的初步效果。

二、設計概念 / Design Concept

關於成型層脫離力模型的建立上，必須先了解兩層材質之間凝聚力的行為與對應的物理參數。關於凝聚力，依據先前研究結果發現，並不能直接透過材料對應關係式或機械測試來計算[6]。若

從簡單的幾何觀念來看，分析成型層脫離力的機構可如下圖2的四個階段來說明，而在整個分離的過程中，成型層與機器基板是呈現動態的彎曲變化。從圖1(a)可看到，剛成形的材料層，屬於三明治狀況，被先前成型的材料層與機器基板夾住。當整體進行上拉的運動時，機器基板開始產生變形，成型層的分離與斷裂開始在接觸邊緣表面產生，如圖1(b)。在持續上拉的運動中，分離的現象會傳遞到接觸面內部，如圖1(c)。最後，在拉拔平台移動一足夠的距離後，分離動作會完成，如圖1(d)。

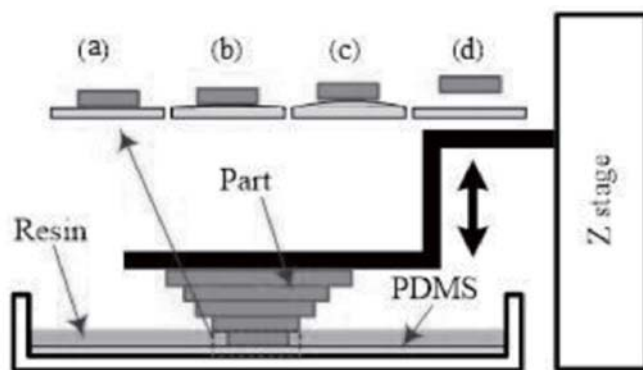


圖1. 在SLA製程中bottom-up類型的分離模型[6]

一般機器成型層分離所用的拉拔方式如圖2中的A與B型，機器基板為固定面，而成型層則透過拉拔方式向上移動，經過一段距離後產生分離。針對固定端點改變的機構，如C型，則是機器基板固定端僅為一邊，另一邊則呈現可自由上拉造成平台變形的懸臂樑運動方式，成型層也經過一段距離後產生分離。D型則以C型為基礎，在機器基板可自由上拉邊加上彈簧，而成型層也會在上拉一段距離後產生分離。

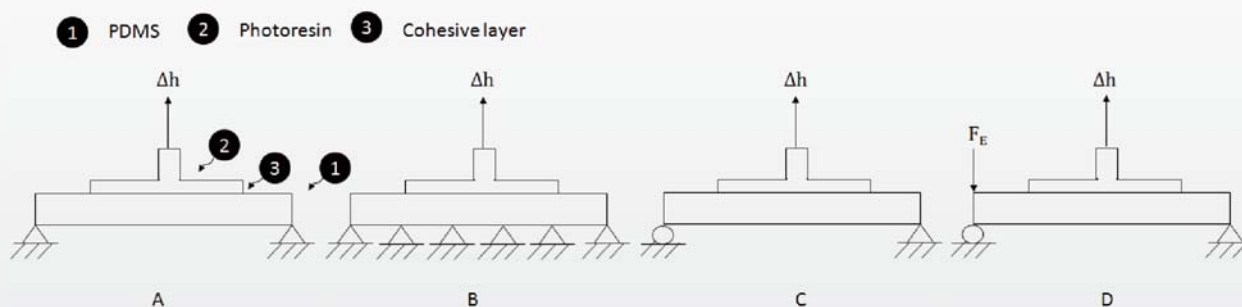


圖2. 四種不同成型物脫離力模型[7]

林與楊[7]分析以上這四種不同的脫離力模型，發現固定整個平台(type A and B)會造成脫離應力集中作用在成型物件上。對於使用結構性不強的材料來列印大面積物件，容易在成型物分離過程中失敗。至於C與D二種模型，固定一端點的脫離模型會從靠近固定端的成型層開始脫離，而應力的分佈多集中於平台上，成型層受剪應力(shear force)的情況較不明顯且數值較小，有助於提升列印的成功率且開始分離的時間則較固定兩端的模型縮短少許。D模型，增加了一彈簧外力於非固定端點，造成剝離與壓置的效果同時產生。另外，此一彈簧力，則能隨著固定平台移動的高度改變。本研究機器的機構設計將參照此概念進行設計。

三、技術開發 / Technical Development

3-1 設計開發與打造列印機器

此機器包括了結構架、投影燈光、可移動式系統、物件平台、液體槽與分離機構模組。圖3是以CAD軟體所繪製出來的機器設計圖，結構架是由面積長寬各30mm的正方形鋁擠型所組成。完整的結構架尺寸為高530mm、長470mm與寬260mm。並且有四個防止振動的腳架放置在底座的四邊。鋁擠所架設出的結構架必須要能夠容納用來照射成型液體的投影燈光模組。此模組採用了BenQ MH684機型，具有Full-HD resolution (1920x1080)、3500 ANSI 流名，且可校正2D特徵和用於圖像調整特徵。

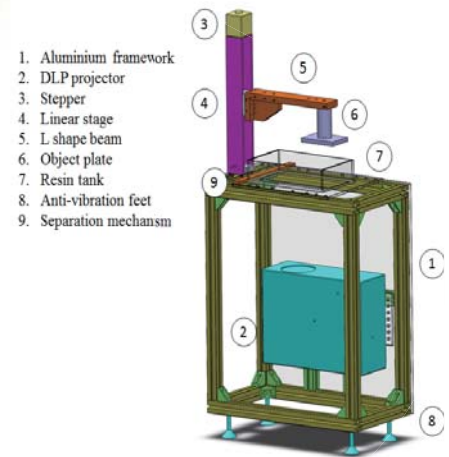


圖3. 機器設計的CAD圖

可移動式系統放置在結構架上，包括了一顆步進馬達可使用來進行垂直移動，另一端連接到物件平台上。此外，有一組導螺桿和線性滑軌會用在線性平台上以提供更準確的運動。關於連接到物件平台上，是透過一個L形狀的懸臂樑來達到。物件平台則會與印刷模型版結合。印刷模型板的表面通常有較高的粗糙度或製作成蜂窩形狀，如圖4所示。光固化樹脂則會傾倒入液體槽中。此液體槽的表面有一層透明的FEP膜，以提供更容易的分離動作。



圖4. 不同粗糙度或蜂窩形狀的印刷模型版

此外，有電源、控制系統和控制面板用來啟動自動列印工作。控制系統是由一塊Arduino Mega 2560的控制板組成，型號A4988的電機屏蔽板和斜坡1.4的馬達控制器。固件和控制面板之間的通信使用Arduino來完成。關於投影光系統的驅動，則是由一條RS232的傳輸線來連接到控制電腦上，讓電腦可直接調整與控制投影光系統。圖5為機器組裝的過程。



圖5. 組裝DLP機器

3-2 機器列印物件程序

3D列印光固化製程的列印程序可分成三階段：前置作業、列印操作與列印完成後的後處理。前置作業階段需要把點雲檔(.stl)匯入切片程式，由程式將每一層列印的圖形製作出。接著須把光固化樹脂倒入溶液槽中高度直到超過從FEP膜的底部所量測到的校準間隙。再列印過程中，物件平台會隨著每一層列印運動由步進馬達帶動而上升。在物件成型層剝離的過程中會產生黏致力效應，物件完成剝離後，物件平台會再下降至下一層型所需的高度。物件平台上升與下降的過程將持續不斷直到最後一層列印結束後停止。列印完整的流程如圖6，而操作過程中的成形層分離可分成被動剝離和自調節兩種方法。另外，當物體列印結束後可使用虛擬驗證來將列印的模型與CAD模型進行比較。

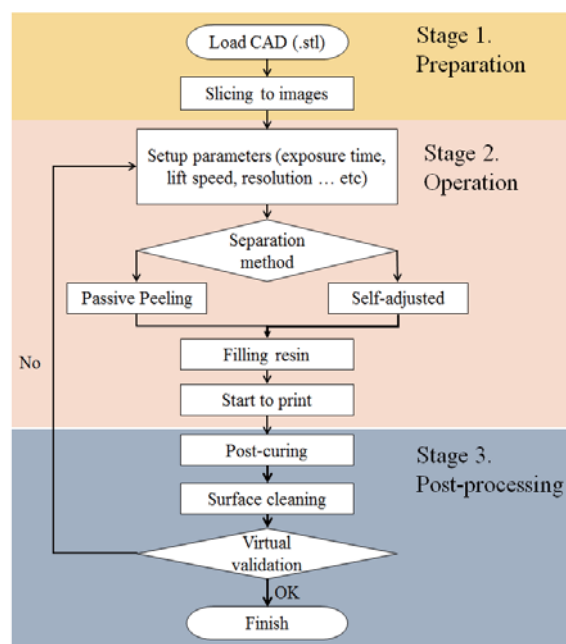


圖6. 開發機器的列印流程

四、技術競爭力 / Technological Competitiveness

在SLA與DLP製程的3D列印機器中，分離行為是影響成型物體品質與良率重要因素之一。此分離行為就是指分離成型物件與底部成型槽。前面提到，主動分離機構是提供一直上或直下的分離力來分離物件。為了達成這樣的效果，成型槽的接觸表面會設計具有可彎曲性。然而，直接的力量將使大型成型物件的分離力有分佈不好的情況且會產生大裂痕。

被動式分離機構是由Kudo3D這間公司所提出[8]。此概念是僅固定成型槽的一端，另一段可以做彎曲變化。當成型槽由於黏滯力關係被往上拉，此成型槽將透過本身材料特性給予一抵抗力來分離成型物，如同圖7(A)所示。然而，壓克力材質的成型槽在彎曲一段次數後容易彈性疲勞與毀損。因此被動式分離機構的使用壽命全依賴成型槽的材料強度。

因此，本研究案提出自調式分離機構，此概念是整合主動式與被動式機構的優點。此設計是整合彈簧系統在成型槽可活動的一端，讓分離運動產生時成型槽仍可以彎曲。當成型槽上拉時，彈簧壓縮力將給予一抵抗力。當黏滯力增強時，更大的壓縮距離將會使彈簧產生更大的壓縮力。反之，則是產生較小的壓縮力。若有需要提供更大的力量，將可以設計由具備較大彈性係數的彈簧來達成。自調式分離機構可以提供連續力來使列印過程更為穩定，可使列印結果更為精確與高品質，同時也可以使列印時間縮短。

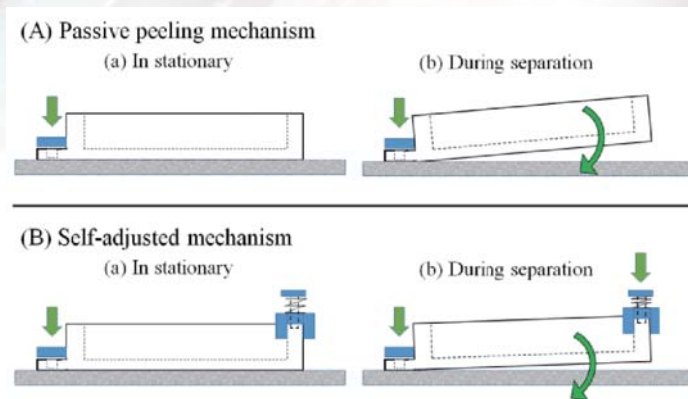


圖7. (A)被動式分離機構 (B)自調式分離機構 的2D釋義圖

五、研發成果 / R&D Result

圖8展示了一系列印成型物的過程，可清楚看到液態的光固化樹脂於溶液底槽透過光照的方式來成型，已成形的區域為中間有發光處。

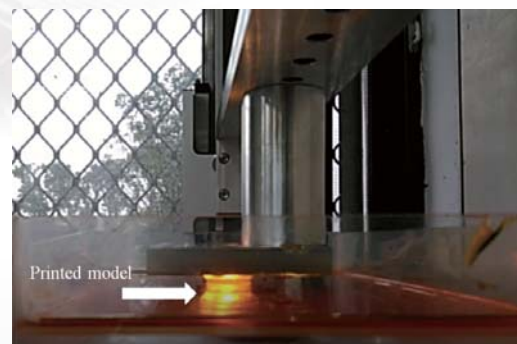


圖8. 光固化樹脂列印物成形的過程

為了確認被動機構與自調式機構在功能性與差異性上的狀況，透過列印物件尺寸的大小來觀察與討論。從實驗結果中發現，被動機構適合列印小型物件，因此可以合理解釋為何現今DLP製程的機器為何在珠寶設計業相當受歡迎。然而，當列印物件尺寸加大後在成型物分離過程中會變得逐漸困難。圖9是一個成功使用自調式機構來完成列印的齒科模型案例。在尚未使用自調式機構來列印時，很常見的列印問題就是物件表面或整個身體上容易產生破壞。

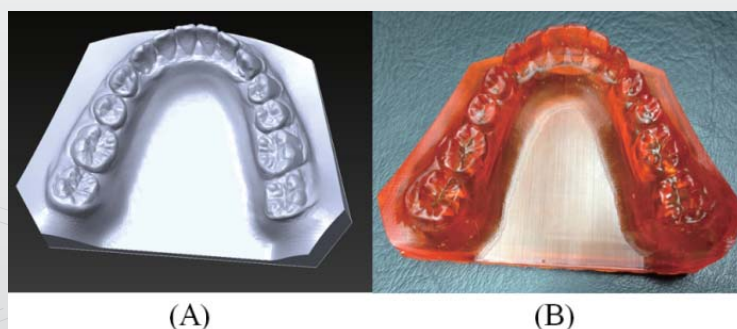


圖9. (A)由逆向工程掃描技術所得到的CAD牙齒模型
(B)由機器列印出所得到的牙齒模型

探討成型分離的現象在DLP列印機器中相當重要。圖10為列印成型物位移與時間關係圖。此圖清楚的呈現出每一層物件在堆疊成型過程中的黏滯力與FEP底板分離的狀況。A點為物件平台與溶液槽FEP底板層的初始距離。AB線段表示曝光成型的時間，B到C階段為物件平台上升直到當初設定好的分離點。CD是靜止期間，然後平台將會下降到下一個成行高度點E。EF表示下一周期，也就是下一層的成型。這種反覆的行為將會持續到最後一個堆疊層G點。

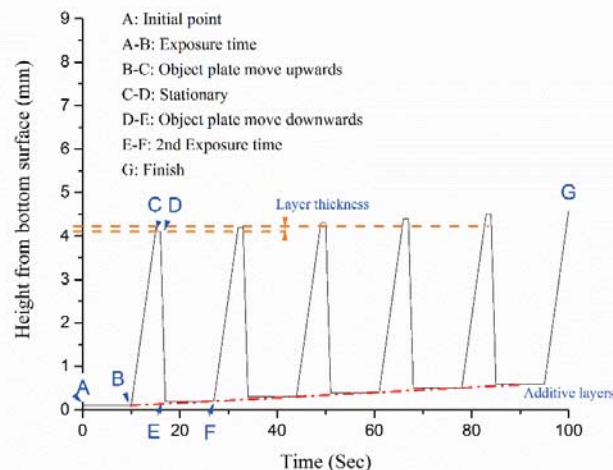


圖10. DLP列印成型物位移與時間關係圖

致謝 Acknowledges

本計畫感謝國立屏東科技大學協助校內教師推動專利技術商品化計畫案經費補助與產學合作中心相關計畫推動人員之支持。

參考文獻 References

- [1] Economist, "Print me a Stradivarius: How a new manufacturing technology will change the world," <http://www.economist.com/node/18114327>, 2011.
- [2] Wikipedia, 3D Printing, website: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
- [3] KV Wong, A Hernandez, A review of additive manufacturing, ISRN Mechanical Engineering, 2012.
- [4] Liravi, L., Das, S. and Zhou, C., "Separation Force Analysis based on Cohesive Delamination Model for Bottom-up Stereolithography Using Finite Element Analysis," Solid Freeform Fabrication Symposium, January, 2014.
- [5] Song, K., Dávila, C. G. and Rose, C. A., "Guidelines and Parameter Selection for the Simulation of Progressive Delamination," Abaqus Users' Conference, 2008.
- [6] Farzad Liravia, 1, Sonjoy Dasb, 2, Chi Zhou, "Separation force analysis and prediction based on cohesive element model for constrained-surface Stereolithography processes", Computer-Aided Design, Volume 69, Pages 134–142, December 2015.
- [7] Lin, Y.S. and Yang, C.J., "A Pilot Study of Separation Force in the Forming Process of DLP 3D Printing", The 19th CSMMT Congress, D-047, October, 2016.
- [8] Kudo3D Inc., URL: <http://www.kudo3d.com/category/psp-container/>, access year: 2016