

產學合作案結案報告書

華機械 104 產學字 009 號

3D 列印塑料擠出製程 產品變形研究

甲方：招氏自動化有限公司

乙方：中華學校財團法人中華科技大學

計劃主持人：藍翔耀

目 錄

摘 要	II
一、簡介	4
二、實驗設備與加工參數	7
三、塑料擠出製程工件尺寸與變形之關係	9
3.1 X方向變化	9
3.2 Y方向變化	12
3.3 工件高度與尺寸精度之關係	14
3.4 內圓孔與尺寸精度之關係	15
四、結論	18
五、參考文獻	19

摘 要

快速成型(Rapid Prototyping, RP)製程，即時下最夯的 3D 列印，是目前在建構原型時一種快速且可行的方法之一，但是不管使用任何材料或建構方式，於加工過程中體積的收縮與膨脹現象總是無法避免的。

本研究在探討工件長度、寬度與高度對收縮變形的關係，以提供相關之變形數據以供有興趣從事塑料擠出製程(FDM)機台反向變形精度補償之參考，藉此修改原始 CAD 圖形，以取得反向變形補償的 CAD 圖形，以再次進行加工，得到較佳的尺寸精度，進而提升快速成型製程在工商業界的應用領域。

關鍵詞：快速成型、3D 列印、逆向工程、精度補償

ABSTRACT

Rapid prototyping (RP), or three-dimensional (3D) printing, is a quick and feasible method for constructing prototypes. However, regardless of the material or construction technique applied, volumetric deformation (i.e., contraction or expansion) is inevitable during RP processes.

This study explored the effects of processing pathways and workpiece height on the degree of deformation in fabricated workpieces. Deform to provide data for the reference interest in FDM machines associated with the improved accuracy of the study.

Keywords : Rapid Prototyping, 3D Printing, Reverse Engineering, compensation

一、 簡介

近年來，快速成型技術快速發展，被世界工業先進國家廣泛的應用於航太、醫療、汽車與其他機械工業之零組件生產製造方面，且由於塑料擠出製程(FDM)在近年專利到期，使快速成型製造技術更廣泛的延伸到個人化設計與文創產業上，在此風潮下，經濟學人雜誌認為，快速成型技術即「3D 列印技術」將製造從工廠生產下放到個人化，將掀起第三次工業革命，快速成型技術其主要特色為可有效的縮短開發時程並加速產品上市時間，以利提高市場競爭力，除此之外，使用快速成型技術在產品設計上，更可符合目前產品的外型多變與多功能性設計，以往此種外型多變且多功能的產品設計，常常必須重覆修改並更變原始設計，因此，若透過順向工程開發模具來製造原型，非常浪費時間與人力成本，但利用快速成型技術來製作產品，更能符合產品開發所需要的快速設計、變更及產品原型的快速製作、降低重複生產、修改所消耗的成本等要求。

在加工過程中，不論是哪一種成型技術，體積的收縮現象皆無法避免，快速原型技術上也不例外，而如何減少因體積收縮所產生的變形而影響產品之精度，提高快速原型加工的目標，進而提升快速成型技術可應用的領域，則應該先了解快速成型製程的原理，以求能夠從中找到產生變形與影響精度的來源。如圖 1 所示，快速成型的加工製程分為：

1. CAD 製程：經由 3D 設計軟體(如市面上的套裝軟體 UG、Pro/E、CATIA、Solid Work、AutoCAD……等)設計產生出 CAD 實體模型(solid model)。
2. 介面轉換：經由電腦程式將實體模型轉換成快速成型機能接受的檔案格式。
3. 切層：依快速成型機的精度與使用者的需求，將 CAD 實體模型分割成一層一層的 2D 薄片。
4. 加工路徑：依使用者需求，規劃加工源加工路徑。
5. 機器加工：加工源依加工路徑規劃，製造出一層一層 2D 薄片堆疊出所需要的 3D 實體形狀。
6. 後處理(post processing)：移除犧牲層、支撐及表面外觀處理。

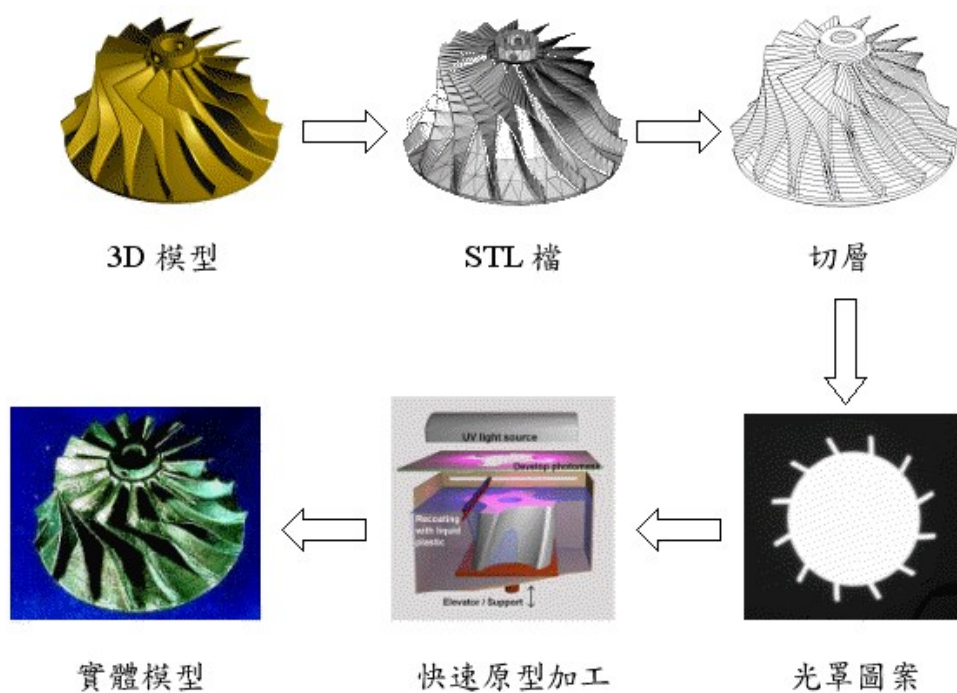


圖 1. 快速成型之加工流程。

由上述的快速成型操作流程與加工原理可知，影響加工精度的因素主要來自於硬體、軟體與加工材料三大方面。在硬體方面的影響則有下列幾項：

1. 系統機構本身的精度。
2. 工作平台移動的精度與速度。
3. 噴頭移動的精度與速度。

在軟體方面的影響有下列幾項：

1. 3D CAD 模型在設計時之內建模組，在描述曲面的數學表示式與精確度所形成之誤差，也就是將 CAD 實體模型數位化時的精度誤差。
2. 模型轉換為三角網格之 STL 格式時所造成的誤差[1]。
3. 切層厚度的選取，切層厚度越厚所造成的誤差越大[2-5]。
4. 快速成型時，機器參數的設定。

加工材料造成的精度誤差，最主要來自於加工材料本身的機械性質，不論是 ABS 或是 PLA 塑膠等加工材料，在加工過程中將材料由固態熔融轉化為半固態之相變化或是溫度變化等所產生的收縮效應。因此加工材料的變化是目前研究快速成型領域中，多數人最想解決的問題。

因為以目前的機構加工技術而言，硬體的精密度已經可以被準確的控制，而軟體所造成的誤差也因電腦演算速度增加與記憶體容量增加而被解決，唯獨只有材料本身的機械性質無法完全克服，所以，有許多的研究與論文致力於觀察與模擬加工材料的加工過程與材料的相變化過程以尋求材料所造成之誤差的解決之道

二、 實驗設備與加工參數

塑料擠出製程(FDM)加工變形較大，較不適宜於精密加工組裝的應用，為了提高塑料擠出製程(FDM)於較精密機械組裝的應用，利用「逆向掃描與誤差檢測」回饋於圖形補償，以獲得較精密之尺寸，方法簡單且可以有效改善工件尺寸精度[6]；本文為了相關製程之研究者參考，以「 $\varnothing 1.75\text{mm}$ 之 ABS 線材」為例，提出 X、Y、Z 方向隨工件尺寸的增加其相對變形的關係，以供有興趣的讀者參考。

本研究選用之快速成型機為閃鑄科技(Flashforge Creator)製作自行組裝之塑料擠出快速成型機，如圖 2 所示。使用的切層與路徑編輯軟體為 MakerBot 公司所開發並可在網路上免費取得的 Makerwave 軟體。工件建構於成形板上，成形板與噴頭的距離即為第一層的厚度，當每層製作完成，Z 軸即下降一層的厚度進行下一層的加工，重覆以上循環之步驟直至工件加工完畢為止。

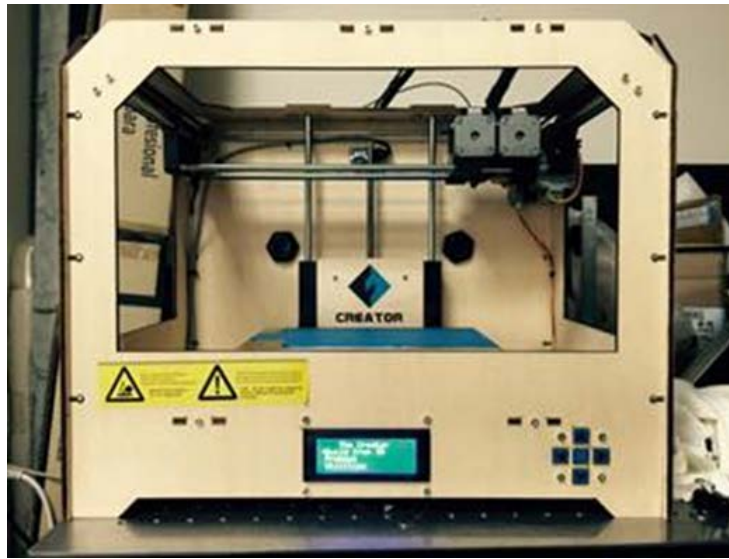


圖 2. 閃鑄科技 Flashforge Creator 塑料擠出快速成型機

為了減小判別誤差，本節於加工時工件放置位置與加工參數全部一致。在以下之範例圖片中，本節使用圖 2 之快速成型機，工件於 Makerwave 軟體內均放置於成形板中間的位置，填充密度(Infill)皆為 100%，外層殼數(Number of Shell)皆為 1，工件下方均有 5mm 高之犧牲層，每層加工厚度為 0.2mm，加工參數設定如圖 3 所示。

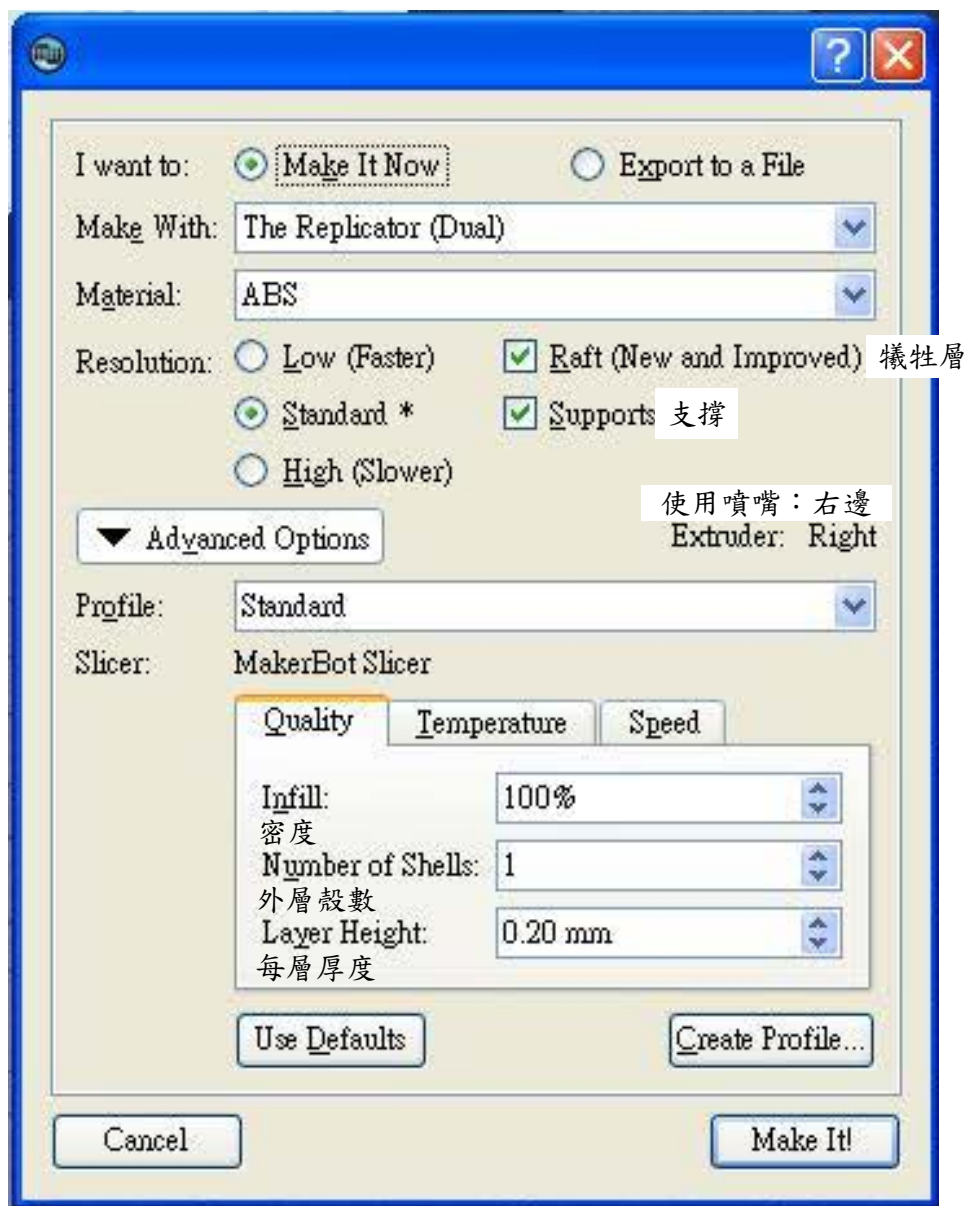


圖 3 Makerwave 加工參數設定

三、 塑料擠出製程工件尺寸與變形之關係

根據 Y. M. Huang 與 H. Y. Lan[7]所提出的快速原型加工精度改善研究中，在自由液面下，雷射光如沿「單一線段掃描」時，會有隧道效應產生，即沿者掃描方向會產生收縮，收縮量與掃描路徑長度成正比，且與掃描方向垂直的側面方向收縮變形較小。為了驗證在塑料擠出製程下是否也會產生相同的變形，本文以 X 與 Y 方向尺寸變化的三維實體元件來實驗。

3.1 X 方向變化

由[7]之隧道效應知，加工路徑程式先沿 Y 方向，因此沿 Y 方向之收縮變形量較大，若工件尺寸 Y 方向較長，可於 Makerwave 軟體內放置工件時先將工件旋轉方向，使尺寸較小的方向朝 Y 方向，即在軟體內放置工件之 STL 檔時，工件長或寬較小的尺寸邊要設定成沿軟體第一道掃描的路徑方向，如此設定可以使工件收縮變形量會稍微的降低。

圖 4 為 Makerwave 軟體在編寫程式時噴嘴移動的加工路徑，其邊界掃描路徑為順時針依序由編號 1 → 2 → 3 → 4 → 1；在編號 1 的路徑上(沿 Y 方向)，乃是該層加工的第一條路徑，由[31]隧道效應結果知，掃描路徑的兩端都會產生收縮，然而在編號 2 的路徑上(沿 X 方向)，因其一端銜接編號 1 的路徑，因此隧道效應之散熱端只剩單邊，因此收縮變形會略小一點。

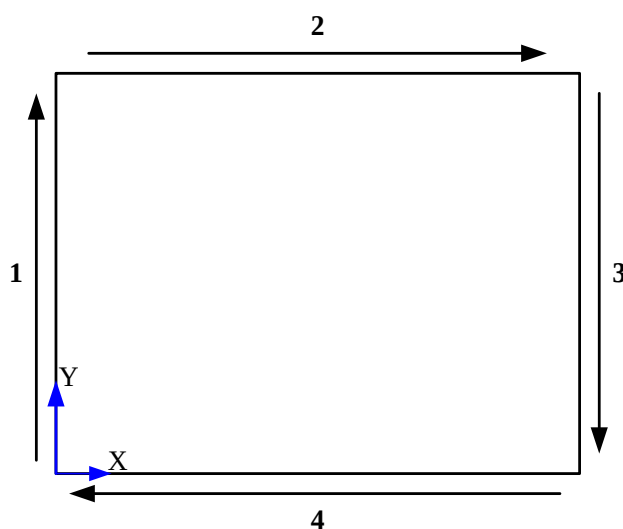


圖 4. Makerwave 軟體編寫之外形輪廓路徑示意圖

如前所述，收縮變形的大小隨著掃描路徑的不同而有所變化。因此本節選用 Y 與 Z 方向長度都固定，而以 X 方向每次增加 10mm 長度的長方形三維實體元件來做為實驗對象，檢測因 X 方向隨工件尺寸的增加其相對變形的關係，如圖 5 所示。

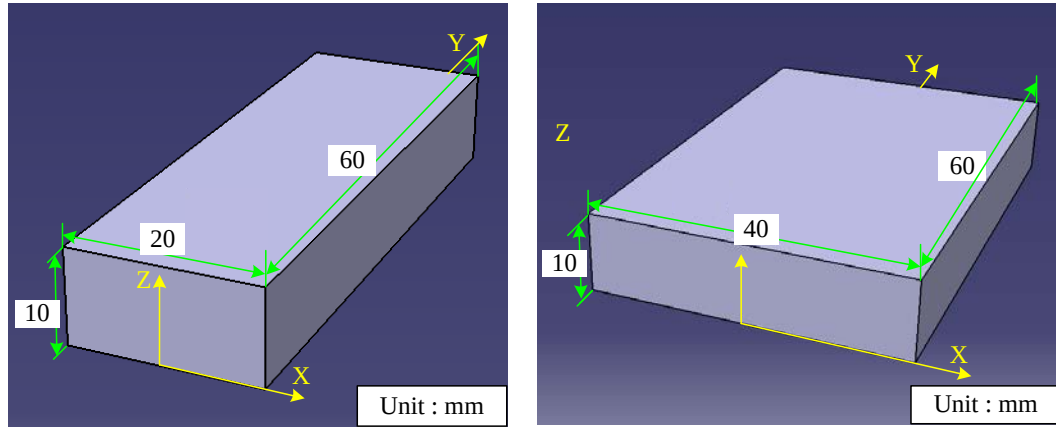
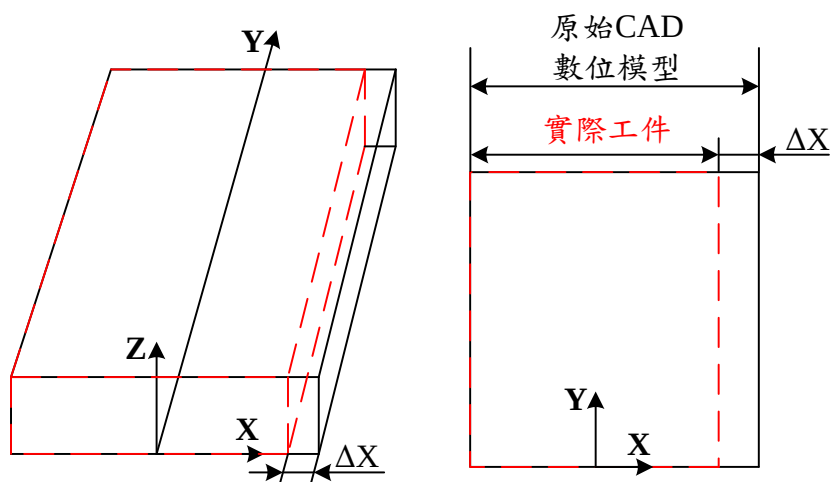


圖 5. X 方向數位模型之變化

圖 6 表示 X 方向收縮變形之示意圖。將隨 X 方向增加之各種不同尺寸工件加工後量測結果製成表 1，可以從表 1 中發現，當 X 方向長度為 10mm 時，實際製造成品為 9.9mm，收縮變形量為 0.1mm；當 X 方向長度為 20mm 時，實際製造成品為 19.85mm，收縮變形量為 0.15mm。圖 7 是以表 1 為參考數據所繪製之 X 方向收縮變形趨勢圖，可以從中發現加工路徑越長，其長度收縮變形量也就越大，且 X 方向每增加 10mm 時，實際製造出來之成品收縮會增加 0.05mm 並且略呈線性上升。



(a) 立體圖

(b) 上視圖

圖 6. X 方向收縮變形示意圖

表 1. X 方向尺寸變化與收縮變形量關係

X 方向尺寸大小與變形量 (unit : mm)		
原始 CAD 數位模型	實際工件 變形尺寸	變形量 ΔX
10	9.9	0.1
20	19.85	0.15
30	29.8	0.2
40	39.75	0.25
--	--	--
備註：X 方向尺寸固定為 60mm 時其收縮變形為 0.5mm		

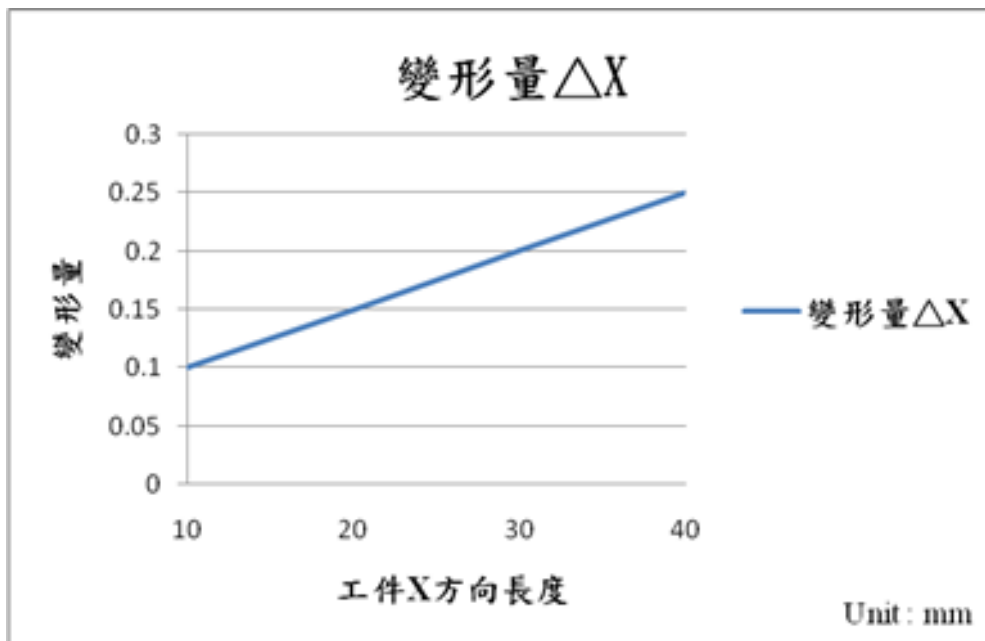


圖 7 工件隨 X 方向尺寸增加之相對收縮變形趨勢圖

3.2 Y 方向變化

如前所述，收縮變形的大小隨著掃描路徑的不同而有所變化。因此，本節選用 X 與 Z 長度都固定，而以 X 方向每次增加 10mm 長度的長方形三維實體元件來做為實驗對象，檢測因 X 方向隨工件尺寸的增加其相對變形的關係，如圖 8 所示。

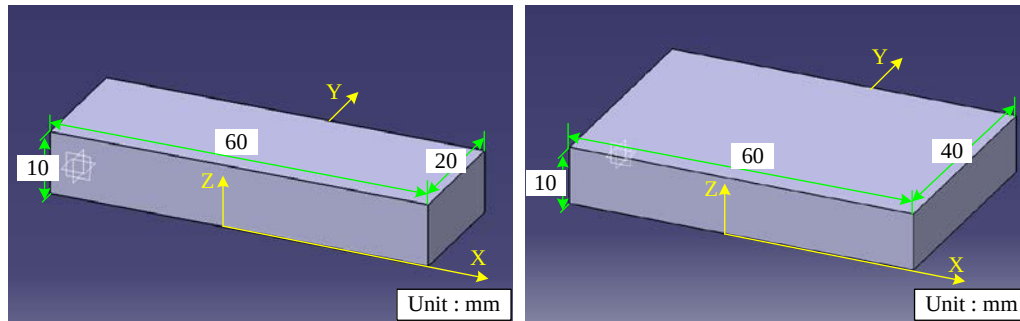


圖 8. Y 方向數位模型之變化

圖 9 表示 Y 方向收縮變形之示意圖。將隨 Y 方向增加的各種不同尺寸工件加工後量測結果製成表 2，從表 2 可以發現，當 Y 方向長度為 10mm 時，實際製造成品為 9.75mm，收縮變形量為 0.25mm；當 Y 方向長度為 20mm 時，實際製造成品為 19.7mm，收縮變形量為 0.3mm。圖 10 是以表 2 為參考數據所繪製之 Y 方向收縮變形趨勢圖，可以從中發現加工路徑越長，其長度收縮變形量也就越大，且 Y 方向每增加 10mm 時，實際製造出來之成品收縮會增加 0.05mm 並且略呈線性上升。

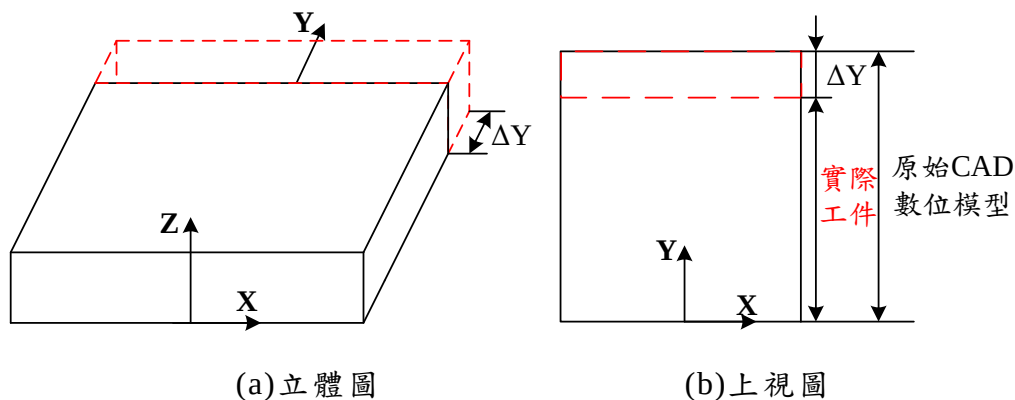


圖 9. Y 方向收縮變形示意圖

由表 1 與表 2 之比較知，當工件長度 X 或 Y 都為 60mm 時，加工路徑先沿 Y 方向掃描所得的變形為 0.5mm，而沿 X 方向掃描所得的變形為 0.35mm，此結果同時也可以應證 3.1 節所述之收縮變形趨勢。

表 2. Y 方向尺寸變化與收縮變形量關係

Y 方向尺寸大小與變形量 (unit : mm)		
原始 CAD 數位模型	實際工件 變形尺寸	變形量 ΔY
10	9.75	0.25
20	19.7	0.3
30	29.65	0.35
40	39.6	0.4
--	--	--
備註：Y 方向尺寸固定為 60mm 時其收縮變形為 0.35mm		

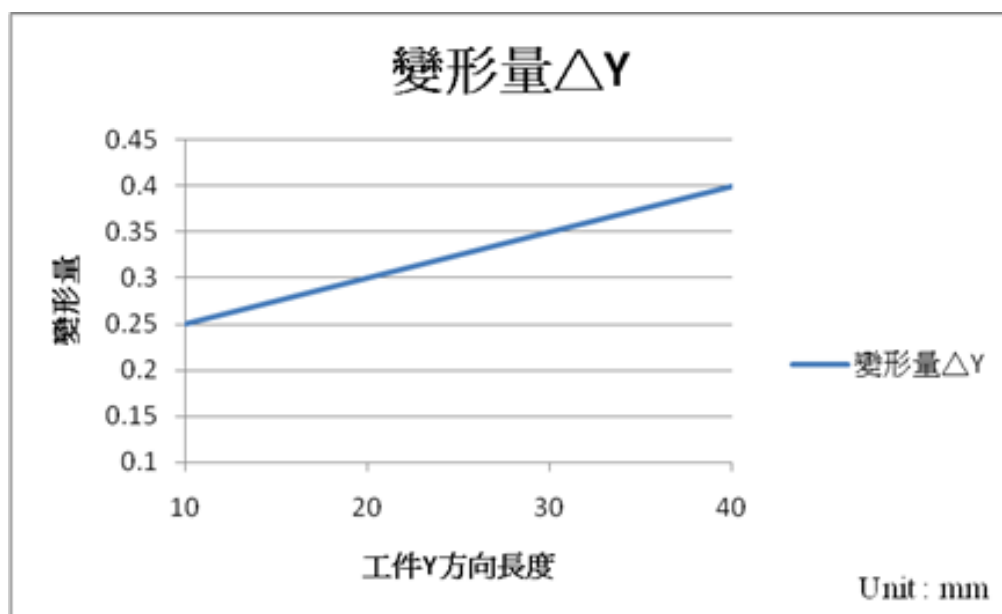


圖 10.工件隨 Y 方向尺寸增加之相對收縮變形趨勢圖

經過 3.1 與 3.2 節 X 與 Y 方向之實驗可以知道，在塑料擠出製程中加工

路徑長度會影響收縮變形，且加工路徑越長，其收縮變形量越大。

3.3 工件高度與尺寸精度之關係

在 3.1 與 3.2 節，了解了 X、Y 方向隨工件尺寸的增加其相對變形的關係，接著來實驗以了解 Z 方向隨工件尺寸高度的增加其相對變形的關係，實驗中選用 X 方向與 Y 方向尺寸都固定，而 Z 方向每次增加 5mm 高度的長方形三維實體元件來做為實驗對象，檢測因 Z 方向隨工件尺寸高度的增加其相對變形的關係，如圖 11 所示。

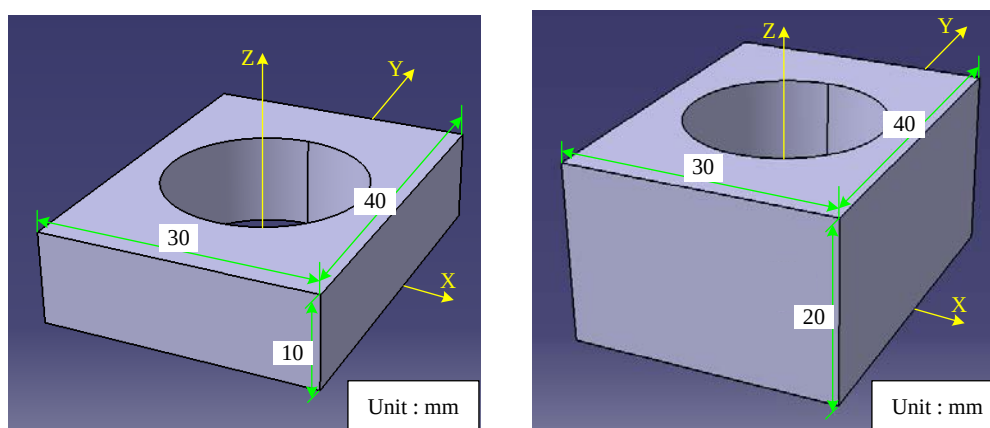


圖 11. Z 方向數位模型之變化

實驗完成其量測之數據如表 3，從表 3 可知當高度(Z 方向)愈高時其 X 方向收縮變形量。

表 3. Z 方向尺寸變化與 X 方向收縮變形量關係

實際量測尺寸								
Z 方向尺寸大小與 X 方向變形量 (unit : mm)								
高度 量測位置	15mm		20mm		25mm		30mm	
	量測值	變形量	量測值	變形量	量測值	變形量	量測值	變形量
5	39.82	0.18	39.82	0.18	39.82	0.18	39.825	0.175
10	39.82	0.18	39.8	0.2	39.8	0.2	39.8	0.2
15	39.895	0.115	39.84	0.16	39.81	0.19	39.8	0.2
20			39.895	0.115	39.835	0.165	39.815	0.185
25					39.875	0.125	39.84	0.16
30							39.86	0.14
最大變形量 ΔXmax	0.18		0.2		0.2		0.2	
備註：								

圖 12 為以表 3 為參考數據繪製其 Z 方向增加 X 方向收縮變形趨勢圖，為使變形能夠更好的表達，X 軸使用變形量來呈現，從圖 12 可知，因高度的變化所產生的變形曲線是一致的，當高度愈高時其收縮變形愈大，且不管工件高度為多少，其最大變形量約發生在略低於高度一半的位置處。然而，圖 12 中 Z 軸下緣 0 ~ 5mm 處之收縮變形易受底部翹曲變形的影響，不易量測判別，且底部面積愈大，底部翹曲影響也愈大。

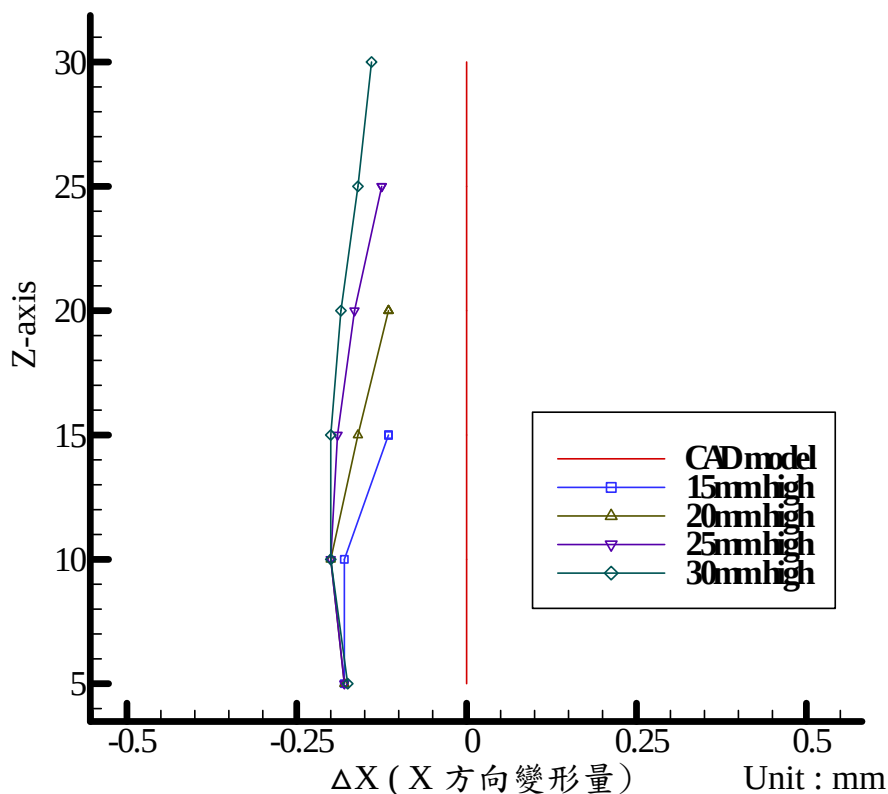


圖 12. 工件 Z 方向尺寸增加之變形曲線圖

3.4 內圓孔與尺寸精度之關係

在 3.2 與 3.3 節探討過 X、Y 與 Z 方向隨工件尺寸的增加其相對變形的關係後，本節選用 X、Y 與 Z 都相同，僅有內圓孔改變的三維實體模型，來驗證塑料擠出製程中，內圓孔大小與其收縮變形量的關係，並了解如何判定實驗機台能製作之最小孔徑為多少，如圖 13 所示，以孔徑每次增加 1mm，來檢驗塑料擠出製程內圓孔大小與其收縮變形量的關係。圖 14 為內圓孔收縮變形示意圖，將內圓孔增加的各種不同尺寸工件量測結果製成表 4 所示。

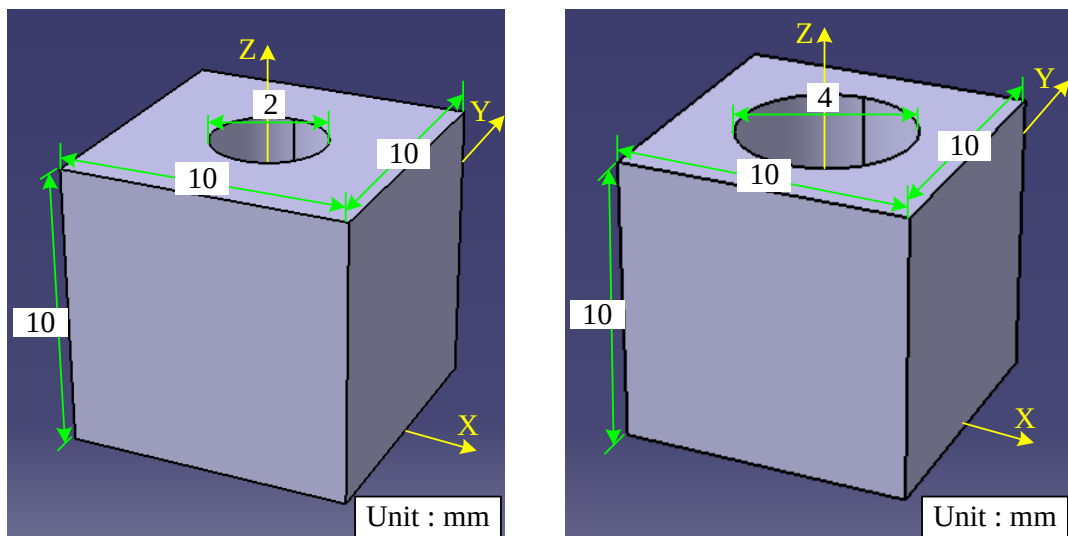
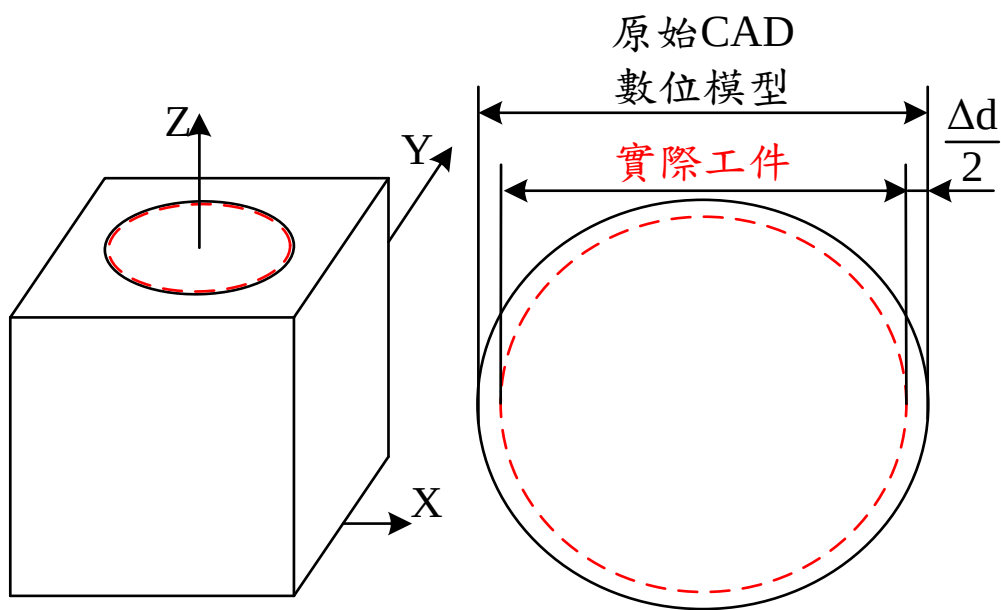


圖 13. 內圓孔數位模型之變化



(a)立體圖

(b)內圓孔上視圖

圖 14 內圓孔收縮變形示意圖

表 4.內圓孔收縮變形量

內圓孔尺寸大小與變形量 (unit : mm)			
原始 CAD 數位模型	實際工件尺寸	變形量 Δd	備註
1	-	-	
2	1.5	0.5	
3	2.8	0.2	
4	3.85	0.15	
5	4.85	0.15	
7	6.85	0.15	
9	8.85	0.15	
22	21.85	0.15	第四章 工件尺寸

由表 4 知，當內圓孔直徑大於 4mm 時，其收縮變形量幾乎是固定的，不會因尺寸的改變而改變，但當內孔直徑低於 3mm 時，其收縮變形量為 0.2mm，開始產生不一致的收縮變形量；內圓孔直徑再減小為 2mm 時，其收縮變形量增加為 0.5mm；當內圓孔直徑再減小為 1mm 時，其收縮變形更是嚴重到幾乎無法量測測量，因此，本研究判定，本實驗機台在製作內圓孔時，其可加工之內圓孔直徑最小解析度為 3mm。因此，若需對內圓孔工件進行反向補償時，反而變得單純與簡單，只需將內圓孔直徑加大 0.15mm 來補償即可。

四、結論

本研究在探討工件長度、寬度與高度對收縮變形的關係，以提供相關之變形數據以供有興趣從事塑料擠出製程(FDM)機台反向變形精度補償之參考，藉此修改原始 CAD 圖形，以取得反向變形補償的 CAD 圖形，以再次進行加工，得到較佳的尺寸精度，以下為本文之研究結果與結論：

1. 本文以 $\phi 1.75\text{mm}$ 之 ABS 材料為例提出工件長度、寬度與高度隨工件尺寸的增加其相對變形的關係，以提供相關之變形數據以供有興趣從事與本研究相關塑料擠出製程(FDM)機台精度改善之參考。
2. 在長度與寬度(X方向與Y方向)驗證時可發現，因掃描路徑愈長，收縮變形愈大，因此於列印軟體上放置工件時，應將長或寬工件尺寸較小的部分朝向軟體列印時第一道加工的方向。以本文為例，因Makerwave軟體編寫加工路徑先沿Y方向加工，因此於Makerwave軟體內放置工件時先將工件旋轉方向，使尺寸較小的方向朝Y方向，如此設定可使工件收縮變形量會稍微的降低。
3. 對於內圓孔工件，每一機台都有其能製作最小孔徑之最小解析度，本實驗機台為3mm，當孔徑大於最小解析度時，其收縮變形有其一致性，因此於製作內圓孔之反向補償圖形時反而變得單純與簡單，只需將內圓孔直徑加大0.15mm來補償即可。

五、參考文獻

1. 林清安，” Pro/ ENGINEER Wildfire 4.0 工程圖製作”，碁峰資訊股份有限公司，2008。
2. D. Ma, F. Lin and C. K. Chua, “Rapid prototyping application in medicine. Part II : STL generation and case study”，International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol. 18, pp. 118-127, 2001。
3. C. J. Luis Pérez, J. Vivancos Calvet and M. A. Sebastián Pérez, ” Geometric roughness analysis in solid free-form manufacturing process”，Journal of Mat. Pro. Tech., Vol. 119, pp. 52-57, 2001。
4. R. L. Hope, P. A. Jacobs and R. N. Roth, ” Rapid prototyping with sloping surface”，Rapid Prototyping Journal, Vol. 3(1), pp. 12-19, 1997。
5. P. E. Reeves and R. C. Cobb, ” Reducing the surface deviation of Stereolithography using in-process technique”，Rapid Prototyping Journal, Vol. (1), pp. 12-19, 1997。
6. 藍翔耀，”液態光造形快速原型系統精度之研究”，國立臺灣科技大學機械工程系博士學位論文，2005。
7. Y. M. Huang and H. Y. Lan, "Path Planning Effect for the Accuracy of the Rapid Prototyping system", accepted by International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2004。