

使用灰色關聯分析法進行 IoT-based 3D列印機多目標優化分析

施驛宸¹、楊政融^{1*}

¹ 國立中山大學人文暨科技跨領域學士學位學程

(MOST 111-2621-M-110-001)

*Email: cjyang0521@mail.nsysu.edu.tw

摘要

在積層製造中，溶融沉積成型的3D列印為目前熱門的製造方法，廣泛的應用在商業、學術教育、醫療、軍事等多個領域。面對眾多的需求下，3D列印機仍有品質和聯網功能不完全問題有待解決。因此，本研究以物聯網打造3D列印系統，結合感測器收集環境相關數據，並透過灰色關聯分析探討列印參數對勞動成本、能源消耗和尺寸精度之間的關聯性，藉此找出不同列印參數之間所造成的其他影響，取得3D列印多目標優化解。

關鍵字： 積層製造、溶融沉積成型、物聯網、灰色關聯分析、多目標優化

1. 導論

1.1 研究動機

三維列印又稱3D列印(3D Print)，為一種快速成型技術(Rapid Prototyping)。3D列印以數位模型檔案為基礎，透過切層軟體進行參數設定後，即可生成列印檔案。以目前最為廣泛使用的類型—融溶沉積成型(Fused Deposition Modeling, FDM)為例，通過軟硬體系統加熱線材至一定溫度，使其融化，再經由控制列印頭位置、擠出馬達，逐層堆疊材料，即可製成三維立體物品。有別於傳統減法加工，具有少量生產複雜性幾何形狀的特性，此項特點適用於客製化加工或是不需大量開模的產品，且列印材料多元、成本較為低廉、容易取得，製造品質也有一定水準^[1-2]。FDM發展至今在軟、硬體方面都變得更加開源化，也有許多自造者會自行組裝、客製化自己的3D列印機3D列印機，能依使用者需求自行客製化機器，也證明3D列印已有一定的發展。

雖然3D列印機的使用方法相對其他製造方法較為簡單，但仍會發生異常問題的情形，常見的問題像是：(1)切層軟體的列印參數設定；(2)列印機器運作情形，第一點與人為因素較有關係，但縱使列印參數設定無誤，還是有可能遇到列印設備狀態不佳等異常情況。

物聯網(Internet Of Things, IoT)是一種透過網

路互相連結實際裝置的技術，讓使用者或其他裝置可以透過網路直接控制物品、或是存取雲端數據資料。在物聯網的時代，可讓物品變得「有意識」，物品與物品之間可以藉由網路互相溝通或是交換資料，使用者只需要在定點位置操作一件物品，即可控制其他物聯網裝置。^[3]

本研究希望結合3D列印機與物聯網技術，安裝各式環境感測器，記錄3D列印機周圍的環境狀態，以及在列印過程中所產生的數據，再將資料回傳至網路雲端，建構完整的物聯網的系統。物聯網系統中的感測器包含：列印環境溫溼度感測器、智慧插座、加速度感測器，這些感測器可以了解機器在列印過程中所生產出的數據，有助於未來診斷與改善機器列印成效。

1.2 文獻回顧

近幾年文獻皆使用各種感應器來收集列印期間機器運轉的數據，並分析設備是否正常。在2018年，Kim等人^[4]架設加速度與聲發射(Acoustic Emission, AE)傳感器紀錄訊號資料，研究帶動CoreXY型機器其噴頭模組的螺栓鬆脫，進而導致列印失效的問題，並驗證非線性支援向量機(Support Vector Machine, SVM)可得到比線性SVM更高的判讀性。此外，為了增加操作者便利性，也利用MATLAB建構一人機使用介面。2019年，Nam等人^[5]採用紅外線攝影機、加速規、聲發射(AE)與熱傳感器來蒐集數據，探討CoreXY型機器成行平台因歪斜所產生堆疊失誤的狀況。同Kim等人的研究成果，他們團隊得到非線性SVM比線性SVM更高的判讀性。2019年，Li等人^[6]嘗試架設電流、電壓、震動與加速度感測器來獲得CoreXY型機器列印的即時數據，並比較LR、SVM和隨機森林在數據判讀上的準確性。從結果得知震動與加速度感測器的數值最能反映出效果，三種演算法精確度都超過90%，但LR演算法的操作最簡單易懂。2019年Zhang等人^[7-8]和Guo等人^[9]使用Delta型機器架設可蒐集三軸角速度、三軸振動加速度與三軸磁場密度數據的感測器，探討擠出機因為關節軸承跟皮帶沒有固定完好所產生的列印失效狀況。他們使用的感測器包括：錯誤融合多個稀疏自動編碼器(EFMSAE)、轉移支援向量機(TSVM)和迴聲州網絡(ESN)，用來確認資料分

類與判讀的功效。

2021 年 Patil 等人^[10] 表示 3D 列印需要一組適當的列印參數，其研究使用灰色關聯分析法（Grey Relational Analysis, GRA）進行多目標分析，選擇填充圖案、填充百分比、列印速度和層厚這四個參數，研究這些參數對表面粗糙度、列印時間和耗費的線材長度的影響。透過 GRA 分析後發現在 3D 列印中使用三角形圖案、填充百分比設置 70%、列印速度設置 100 mm/h 和層厚為 0.2 mm 是最佳參數。

由文獻所示，人們需要的不再只是只能生產物品的機器，想要瞭解機器裡的運作細節，在機器上架設各種感測設備，讓機器具備蒐集自身、環境數據的能力，為的就是提高機器的運行效率、降低能源消耗、預測機器生產品質的好壞等能力，並結合物聯網的功能傳輸、儲存數據並進行運算。另外，物聯網技術可與其他技術相輔相成，像是：物聯網所產生的大量數據，利用機器學習、影像辨識等能力，提早預測生產過程所發生的事件。雖然前段所述之文獻都是使用在 3D 列印機上，但是把這些觀念引用至其他製造機器上，除了會達到相似的效果與功能，可能會進而得出較不一樣的結果，值得後續對各式製造機器有更多的探討。

1.3 研究目的

在製造領域中，各項參數的設定、機器的運作狀態皆會造成許多影響，包含：製造的產品品質、能源消耗的多寡、環境衝擊等，不單純只影響產品品質，而是影響到諸多環境，這些與我們、環境都息息相關。本研究將以 Delta 型 FDM 3D 列印機為案例，運用物聯網架構下的感測器收集數據，並利用灰色關係分析法探討散熱風扇轉速、列印速度、噴頭溫度、熱床溫度和層厚這些參數對耗能、尺寸精度、勞動成本的關係，進而得以改善列印品質、減少人力與環境成本。

2. 研究方法

2.1 實驗工具

2.1.1 物聯網感測器

本研究使用 DHT11 溫溼度感測器與 ADXL345 加速度計，記錄 3D 列印機製造過程的數據。DHT11 可同時收取溫度和濕度的數據，感測器量測範圍為溫度：0°C~50°C、濕度：20%~90%，適合在列印機台擺放的環境中使用（如圖一）；而 ADXL345 三軸加速度計（如圖二）是一款體積較小的感測器，非常適合在移動的設備上使用，此感測器可以等位輸出加速度計，無須再轉換類比訊號，可同時節省系統成本和電路板面積，從而進行低功耗感測與數據紀錄^[12]。



圖一：DHT11 溫溼度感測器



圖二：ADXL345 三軸加速度計

本研究使用 ESP8266 CP2102 NodeMcu Lua Wi-Fi 物聯網開發板（如圖三），透過此開發版將感測器的數據上傳至雲端，使用方式與 Arduino UNO 板（如圖四）一樣，開發版上有提供多支 IO 腳位，可與感測器連接，且能在 Arduino IDE 開發環境中撰寫程式並燒錄至開發版中。



圖三：ESP8266 Wi-Fi 物聯網開發板



圖四：Arduino UNO 開發板

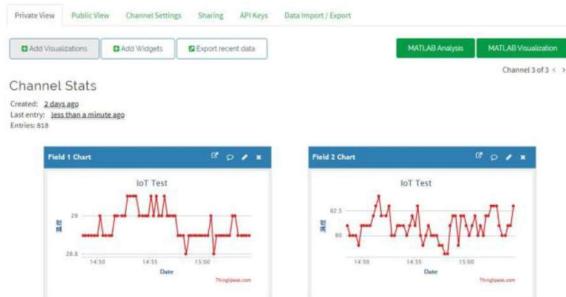
在能源監測方面，本研究使用 TP-Link 的 HS100 智慧型插座（如圖五）^[13]，此型號之智慧型插座可即時監測輸出電力的瓦數和消耗的電力，將用來感測 3D 列印機在各列印階段的能源消耗情形。



圖五：TP-Link HS100 智慧插座

2.1.2 物聯網平台

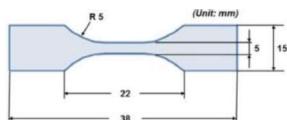
本研究使用雲端平台 Thingspeak，其為一個物聯網應用程式平台^[14]，免費提供雲端資料儲存及分析應用，透過其提供的 API 服務，ESP8266 可以即時透過網路上傳數據至 Thingspeak 的雲端資料庫，並且能建立多個頻道（Channel）和取得特定的 API，以分別傳送感測器至個別的頻道（如圖六）。



圖六：Thingspeak 頻道

2.1.3 實驗列印試片與機器

本研究考量尺寸之重複性與精度，列印的形狀為拉伸試驗所使用之列印試片，標準為 ASTM-D1708(如圖七)，厚度為 3mm，使用 Solidworks 3D 繪圖軟體繪製三維檔案，並使用 Cura 切層軟體設定列印參數、輸出列印路徑參數檔案 (G-code)，將檔案儲存至 SD Card 後，放入 3D 列印機進行讀取與列印。



圖七：ASTM-D1708 試片尺寸



圖八：試片列印放置位置（擷取自 Cura 切層軟體畫面）

本研究使用ATOM Delta 型的 3D 列印機作為本實驗之 FDM 列印機器（如圖九），其由三組並聯臂連桿機構所組成，而每組機構有兩根連桿，以線性導軌方式傳動、移動擠出頭至對應的位置。



圖九：Atom Delta 3D 列印機

2.2 實驗設計

本研究探討列印品質與耗能之關係，其中實驗參數包含散熱風扇運轉速度、列印速度、噴頭溫度、熱床溫度和層厚，除了熱床溫度只有兩個水準以外，其他四個參數皆有三個水準（見表一），因此選擇 GRA 作為分析方法，並依此使用 Minitab 規劃了 18 組實驗（見表二）。

表一：各項實驗參數與水準

參數	水準 1	水準 2	水準 3
風扇轉速 (%)	100	50	--
列印速度 (mm/s)	30	25	20
噴頭溫度 (°C)	210	200	190
熱床溫度 (°C)	60	30	0
層厚 (mm)	0.3	0.2	0.1

如表一所示，每一項實驗參數中有多少個不同的實驗測試的參數值，即為幾個因子水準，例如：風扇轉速這項參數變動的數值有 100% 和 50% 這兩個，即為 2 個因子水準，以此類推。除了 A 參數之外，其他 B、C、D 與 E 的實驗參數分別皆有 3 個，就會有 3 個水準。本研究之實驗因子與水準較多，因此本實驗採用灰色關係分析法，並且搭配田口直交表 L18，如下表二。

表二：L18 實驗總表

實驗編號	風扇轉速 (%)	列印速度 (mm/s)	噴頭溫度 (°C)	熱床溫度 (°C)	層厚 (mm)
1	100	30	210	60	0.3
2	100	30	200	30	0.2
3	100	30	190	0	0.1
4	100	25	210	60	0.2
5	100	25	200	30	0.1
6	100	25	190	0	0.3
7	100	20	210	30	0.3
8	100	20	200	0	0.2
9	100	20	190	60	0.1
10	50	30	210	0	0.1
11	50	30	200	60	0.3
12	50	30	190	30	0.2
13	50	25	210	30	0.1
14	50	25	200	0	0.3

15	50	25	190	60	0.2
16	50	20	210	0	0.2
17	50	20	200	60	0.1
18	50	20	190	30	0.3

完成實驗後，須將數據進行以下處理，包含：數據歸一化 (Normalized data results, 式1)、灰色關聯係數 (Grey Relationship Coefficient, GRC, 式2) 及灰色關聯度 (Grey Relationship Grade, GRG, 式3) 來分析實驗數據，並且分析影響製造品質的實驗參數後，即可得出最佳參數組合。其與田口實驗法相比，田口實驗法只能對於望大、望小或望目等特性進行單一特性或品質進行分析與評估；不同的地方是，GRA 可同時進行望大、望小與望目等多重特性分析，滿足多重特性之分析，具有較好的最佳化效果。本實驗依照研究目標與後續分析之指標 (耗能、尺寸精度、勞動成本)，皆採用望小特性 (數值越小越好) 進行分析。

$$X_i^*(k) = \frac{\max[X_i(k)] - X_i(k)}{\max[X_i(k)] - \min[X_i(k)]} \quad (1)$$

$$\gamma_i(k) = \frac{\Delta \min + \zeta \times \Delta \max}{\Delta o_i(k) + \zeta \times \Delta \max} \quad (2)$$

在式2中， ζ 代表辨識區分係數，其數值範圍為 $0 \leq \zeta \leq 1$ ，本研究皆以 0.5 進行計算與分析。

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i(k) \quad (3)$$

3. 結果與討論

列印過程能源消耗由智慧插座紀錄，經過整理成一 CSV 檔後出圖，目的除了觀看數據是否正常外，也可以直接從圖面得知各個時段中機器的列印階段。實驗數據是從機器開機時開始記錄，直到機器完成列印後才停止紀錄，因此在第一階段前的數值會是機器開機時所消耗的電能。從瓦數消耗的落差可明顯地分為六個階段：

1. 噴頭加熱，並且經由擠出機將 PLA 線材進線至噴頭中。
2. 選擇列印的 G-code 檔，熱床與噴頭加熱至切層時設置的溫度，耗能數值大幅上升，持續加熱至指定溫度後才完成此步驟。
3. 加熱完成後，列印機開始列印。
4. 還是在列印期間，但此階段耗能卻上升至與第二階段加熱時所使用的耗能相同，由機器動作行為推斷，第四階段讓噴頭與熱床再次加熱至指定溫度，其原因是切片軟體內設置列印完成後，欲將噴頭內的線材退線，因此再次加熱至指定溫度。由上述所示，可知機器即將完成列印，因此將噴頭與熱床加熱至指

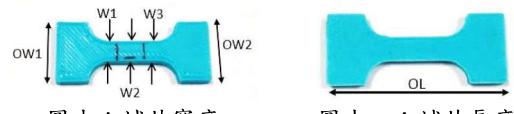
定溫度，以便抽離線材。

5. 第四階段加熱至指定溫度後，噴頭移動至列印物旁，並且將線材抽離噴頭，噴頭與熱床停止加熱，因此與第三階段的耗電量相似。

6. 噴頭回機器原點，因此維持在機器開機時的電能。

針對多目標優化，本次實驗採取灰色關聯分析—田口L18直交表，針對可能影響 3D 列印成品尺寸精度、耗能、勞動成本的五個控制因子 (散熱風扇運轉速度、列印速度、噴頭溫度、熱床溫度和層厚) 來計進行實驗設計。尺寸精度量測之數值 (W、OW、OL、T) 為公差值，其與耗能、勞動成本皆希望數值越小越好，故皆採用望小特性進行分析，以下說明數據的量測方式與灰色關聯分析目標最佳化的實驗結果。

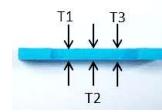
在數據量測部分，以第一組實驗為例，本研究之實驗數據可分為兩個部分，一是列印試片的尺寸，二是感測器蒐集到的數據。由於實驗主要目的探討品質與機台耗能之間的關係，將會量測試片寬度、長度與厚度等部分 (如圖十至十二)，以達到尺寸之重複性。量測完尺寸後，計算重複性尺寸之平均，再將平均值減去原始標準尺寸，作為最終數據。在耗能部分，則是擷取智慧插座軟體中的消耗電量作為列印耗能值。而勞動部分則是根據列印時間，計算加工製作所需要的時間，並以目前勞工基本工資時薪 168 元計算，即可得出列印本次物品所需的勞動成本。



圖十：試片寬度



圖十一：試片長度



圖十二：試片厚度

下表三為所有實驗組別量測到的數據，並依照量測的數據經過數據歸一化、計算灰色關聯係數，算出灰色關聯度 (下表四)。

表三：18組實驗量測之數據

實驗編號	W (mm)	OW (mm)	OL (mm)	T (mm)	耗能 (kWh)	勞動成本 (NTD)
1	0.30	0.45	0.72	0.02	0.02	24
2	0.52	0.65	0.61	0.03	0.01	43
3	0.41	0.56	0.78	0.02	0.02	105
4	0.65	0.86	1.05	0.06	0.01	36
5	0.67	0.65	0.87	0.03	0.02	85
6	0.32	0.49	0.71	0.03	0.02	36
7	0.59	0.69	0.85	0.05	0.05	71

8	0.31	0.53	0.70	0.13	0.01	15
9	0.47	0.63	0.87	0.03	0.01	53
10	0.68	0.75	0.95	0.09	0.01	36
11	0.59	0.66	0.86	0.01	0.05	76
12	0.38	0.56	0.78	0.06	0.01	16
13	0.55	0.93	1.43	0.03	0.01	15
14	0.59	0.72	0.89	0.03	0.03	43
15	0.52	0.57	0.83	0.02	0.02	83
16	0.47	0.64	0.83	0.04	0.02	71
17	0.48	0.72	0.97	0.05	0.01	15
18	0.61	0.79	0.98	0.05	0.04	53

表四：18組實驗之 GRG 值

實驗編號	GRG
1	0.840
2	0.723
3	0.646
4	0.567
5	0.559
6	0.785
7	0.485
8	0.806
9	0.638
10	0.567
11	0.550
12	0.768
13	0.645
14	0.558
15	0.618
16	0.581
17	0.685
18	0.474

計算完GRG值後，再經由 Minitab 分析出望小特性雜訊比 (Signal-to-noise ratio, S/N, 式4)，同時產生各項因子影響的重要程度 (如表五)、各因子對應之水準結果 (如圖十三)。

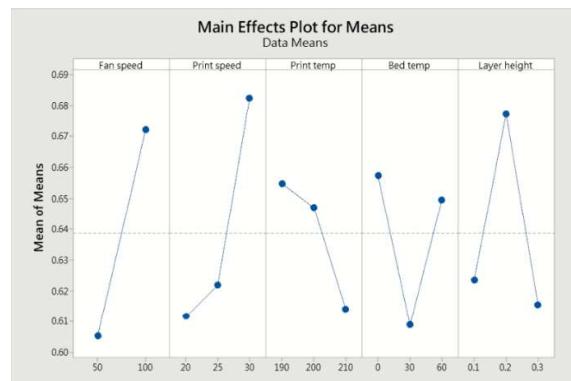
$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n k y_i^2\right) \quad (4)$$

表五：各因子對應的水準差距與排名

水準	風扇轉速 (%)	列印速度 (mm/s)	噴頭溫度 (°C)	熱床溫度 (°C)	層厚 (mm)
1	0.6052	0.6116	0.6548	0.6574	0.6234
2	0.672	0.6219	0.6471	0.6089	0.677
3		0.6824	0.614	0.6496	0.6154

最大差距	0.0668	0.0709	0.0408	0.0485	0.0616
排名	2	1	5	4	3

由上表可知，影響 3D 列印之尺寸精度、耗能和勞動成本的因子程度為：列印速度 > 風扇轉速 > 層厚 > 熱床溫度 > 噴頭溫度。



圖十三：各因子對應之水準結果

由上圖可看出各因子最佳的水準，風扇速度 100%、列印速度 30%、列印溫度 190°C、熱床溫度 0°C、層厚 0.2mm 是最佳的列印參數配方。

4. 結論

本研究結論可分為兩個部分，第一、感測器收取數據的結論；第二、藉由 GRA 分析法找出各項參數影響列印品質與耗能、勞力成本之間的關係。

第一部分為感測器所收取數據之結論，感測器數據在列印期間進行擷取後，除了理解機器是否處於正常運作外，也可以直接從圖面得知各個時段中機構運動的狀況。

第二部分為 GRA 分析，由各因子對應之水準結果可知，在參數設置部分，列印速度、風扇轉速、層厚影響 3D 列印之尺寸精度、耗能和勞動成本較為顯著，在設置參數時，可以優先考量列印速度、層厚、風扇轉速，以獲得更佳的品質、能耗表現和較低的勞動成本。另外，藉由 GRA 分析後，我們也得可得知最佳的列印配方 (風扇速度 100%、列印速度 30%、列印溫度 190°C、熱床溫度 0°C、層厚 0.2mm)，可以做為切層設置參數時的優先參數。

在各因子對應之水準結果 (如圖十三) 可發現較高的風扇速度、列印速度和較低的列印溫度、熱床溫度，可以獲得較高的品質、能耗表現和較低的勞動成本，這邊值得注意的是，這是綜合因子比較得到的結果，並不代表設置較高的列印溫度可以獲得好的能耗表現，其數值是各因子與水準相輔相成所產生的結果，無法作為單一因子之推論。單一因子的目標優化可利用田口方法中的因子水準圖與變異數分析來取得。

5. 謝謝

論文為科技部計畫編號：MOST 111-2621-M-110-001之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

1. Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive manufacturing technologies. New York: Springer, 2010.
2. Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q., Nguyen, David Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," Composites Part B: Engineering, Vol.143, pp.172-196, 2018.
3. 張志祺，2019，「物聯網」時代也來了！萬物究竟要怎麼變得有智慧？網址：
<https://www.youtube.com/watch?v=9VbFUwiQDCQ>
4. Jung Sub Kim, Chang Su Lee ,Sung-Min Kim, "Development of Data-Driven In-Situ Monitoring and Diagnosis System of Fused Deposition Modeling (FDM) Process Based on Support Vector Machine Algorithm", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol.5, No.4, pp-479-486, 2018.
5. Jungsoo Nam, Nanhyeon Jo, Jung Sub Kim, Sang Won Lee, "Development of a health monitoring and diagnosis framework for fused deposition modeling process based on a machine learning algorithm", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019.
6. Bing Li, Lin Zhang, Lei Ren and Xiao Luo, "3D Printing Fault Detection Based on Process Data", Proceedings of 2018 Chinese Intelligent Systems Conference, Lecture Notes in Electrical Engineering 529, 2018.
7. Shaohui Zhang, Zhenzhong Sun, Jianyu Long, Chuan Lia, Yun Bai, "Dynamic condition monitoring for 3D printers by using error fusion of multiple sparse auto-encoders", Computers in Industry, Vol. 105, pp.164-176, 2019.
8. Shaohui Zhang, Kun He, Diego Cabrera, Chuan Li, Yun Bai, Jianyu Long, "Transmission Condition Monitoring of 3D Printers Based on the Echo State Network", Apply Science, Vol.9, 3058, 2019.
9. Jianwen Guo ; Jiapeng Wu ; Zhengzhong Sun, Jianyu Long ; Shaohui Zhang, "Fault Diagnosis of Delta 3D Printers Using Transfer Support Vector Machine With Attitude Signals," in IEEE Access, vol. 7, pp-40359-40368, 2019.
10. Patil, P., Singh, D., Raykar, S. J., & Bhamu, J. (2021). Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components. Materials Today: Proceedings, 45, 4880–4885.
11. 鄭智遠，2019，Arduino 實驗十一：DHT11 數字溫濕度傳感器。網址：
<https://reurl.cc/XVr3AD>
12. ADXL345 三軸加速度計。網址：
<https://www.playrobot.com/accelerometers/1015-arduino-adxl345.html>
13. TP-Link HS100 WiFi 智慧插座。網址：
<https://www.tp-link.com/tw/home-networking/smart-plug/hs100>
14. 淺談 IoT 和 ThingSpeak.com，2015。網址：
<http://pizgchen.blogspot.com/2015/07/iot-thingspeakcom.html>