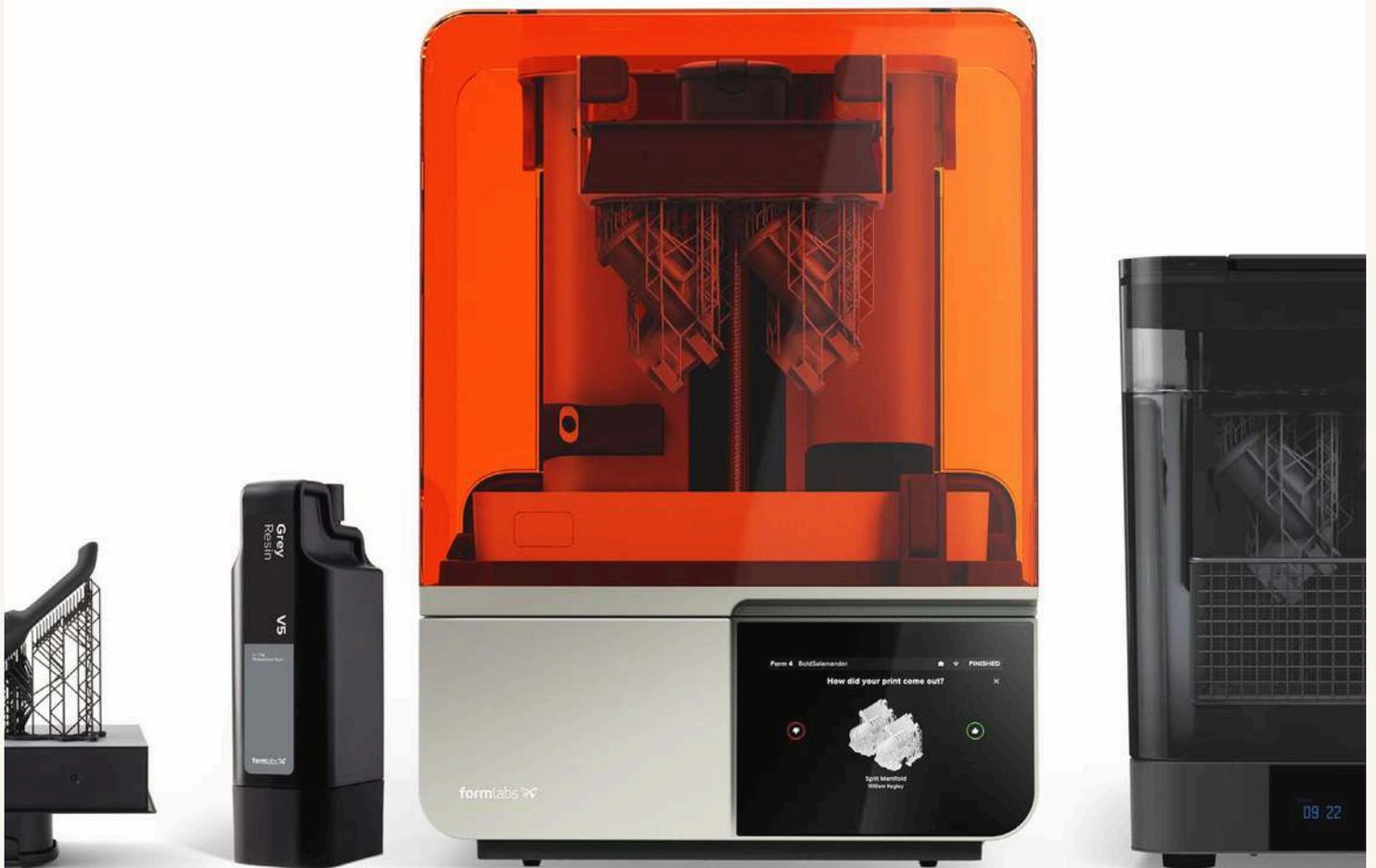


Form 4 與他牌 3D 列印機 測試穩定性分析報告



內容

簡介	3
方法論	5
列印機與材料	5
3D模型與切片	6
標準作業程序	7
觀察與測量數據	9
測試結果	12
硬體穩定性	12
列印機穩定性	12
總結	16
附錄	17
1.0 模型介紹	17
2.0 列印設定	18
3.0 定義	19

介紹

歷史背景：增材製造（AM），也就是我們常說的3D列印，已經成為各行各業加速產品開發與製造的強大工具。對於任何用來製作零件的工具來說，穩定性都是關鍵，3D列印也不例外。雖然在過去十年，3D列印技術已經有了很大的進步，但許多列印機還是因為穩定性不足而受到限制。**根據2024年3D列印產業的調查，增材製造領域的領袖們指出，「列印機與製程的穩定性」是讓3D列印技術能夠更廣泛應用的最大挑戰。**

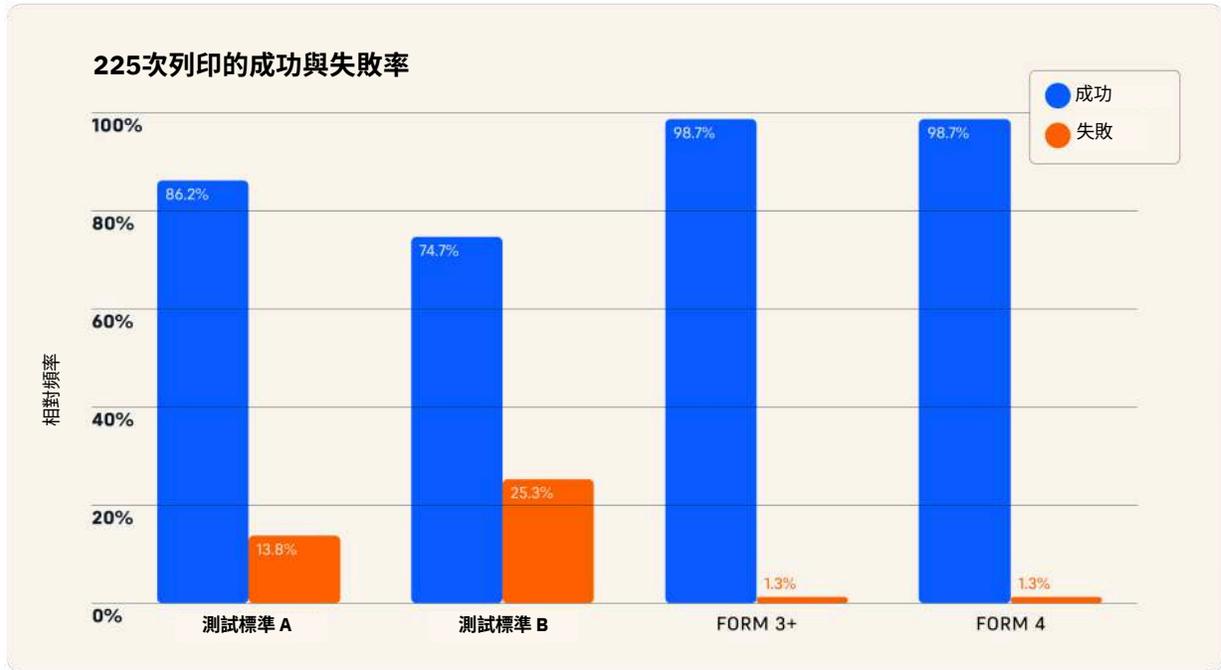
問題：目前為止，客戶在做購買決策時，並沒有可靠的量化資訊可以參考，只能依賴品牌名稱和「花多少錢，得多少貨」的觀念來選擇。為了解決這個問題，Formlabs 編寫了這份報告，總結了對幾款光固化（SLA）3D列印機的全面性能測試，包括 Form 4、Form 3+ 以及兩款較為平價的樹脂3D列印機。測試的目的是評估這些列印機在列印成功率以及零件重複列印穩定性方面的表現。

如何：為了確保資料的品質和完整性，這些測試是由一家獨立的全球領先產品測試機構進行，並在第三方測試實驗室的現場設施完成的。Formlabs 作為 Form 4 的製造商，定義了測試所使用的項目和流程，這些細節會在本白皮書的後續章節中說明，目的是希望能為所有列印機建立統一的測試標準。這份標準作業程序（SOP）主要是透過從標準設定列印模型，並在每個步驟中進行品質檢查，確保處理過程一致，藉此減少使用者操作失誤對結果造成的影響。

方法：按照標準作業程序（SOP），每款列印機會在每個廠商提供的五台不同工廠條件下列印15個模型，每個模型列印三次，總共每款列印機進行225次列印，並記錄每次列印的成功與否。

結果：Form 4 的列印成功率達到98.7%，與 Form 3+ 相同，後者經過五年的持續優化，提升了在現場的表現。相比之下，基準列印機 A 和 B 的成功率分別是86.2% 和74.7%，也就是說，失敗率分別是13.8% 和 25.3%（Form 4 只有1.3%）[詳如P.12表格]。這表示基準列印機的失敗率是 Form 4 的10到20倍，尤其是基準 B，每列印四次就會失敗一次。更重要的是，這些數據還沒有考慮到硬體穩定性的問題——基準 B 的兩台列印機一開始就無法啟動，必須換機才能繼續測試。這不僅浪費了好幾天的工作時間來更換硬體，還花了很多時間來處理故障、清理失敗的列印，甚至重設列印機重新列印。

這些結果是在實驗室內，具備最佳條件下取得的，而且使用的模型在所有四台測試過的列印機上都能順利列印。需要特別強調的是，實際使用時，尤其是使用者自行設計的模型，列印成功率通常會較低。舉例來說，根據 Formlabs 目前的數據，Form 4 在實際環境中的列印成功率大約是94%。



這張圖表顯示，Form 4 在桌上型樹脂3D列印機中，穩定性遠遠勝於其他機型。

影響3D列印機穩定性的因素有很多。例如，Formlabs 會花上好幾週來驗證每種材料的列印設定，確保公開發佈前的穩定性，並且擁有自動化的診斷與監控系統，能在實際使用過程中持續改善。除此之外，Formlabs 還會對每款新列印機進行多輪的驗證與測試，每台列印機出廠前也都會經過60項校準與品質檢查。這些工程設計、材料科學、設定調整、現場監控及品質管制 (QC) 的結合，造就了高穩定性的表現。

Formlabs 的目標是繼續這項工作，為自家的列印機設定標準，同時也希望能公開這些標準，讓客戶不僅能了解 Formlabs 的穩定性，還能獲得其他品牌的可靠資訊。

列印機	FORM 4	FORM 3+	測試標準 A	測試標準 B
到貨即損	0	0	0	2
目標列印數量	225	225	225	225
完成的列印	225	225	225	216
失敗的列印	3	3	31	55
失敗率	1.3%	1.3%	13.8%	25.3%
上市年份	2024	2019	2023	2022
列印體積	7.9 x 4.9 x 8.3 in	5.7 x 5.7 x 7.6 in	7.8 x 4.7 x 8.6 in	8.6 x 4.8 x 9.3 in
列印技術	MSLA	Laser SLA	MSLA	MSLA

列印機	FORM 4	FORM 3+	測試標準 A	測試標準 B
異常模式	<ul style="list-style-type: none"> • 缺失區塊(x2) • 列印中斷(x1) 	<ul style="list-style-type: none"> • 缺失區塊(x2) • 翹曲變形(x1) 	<ul style="list-style-type: none"> • 黏附不良(x13) • 分層現象(x7) • 缺失區塊(x6) • 裂紋(x5) 	<ul style="list-style-type: none"> • 黏附不良(x31) • 裂紋(x10) • 缺失區塊(x6) • 分層現象(x5) • 液晶顯示器故障(x2)
非列印相關問題	過期固件(x1)	無	<ul style="list-style-type: none"> • 所需薄膜 • 替換 (x5) 	<ul style="list-style-type: none"> • 歸位失敗(x7) • LED模組故障(x1) • 液晶顯示器故障(x2)
列印中斷時間	9	17	>100	>250

列印流程說明

列印設備與耗材



Form 4 列印機，搭配 Form Wash、Form Cure 後處理系統，還包括列印平台和自動樹脂匣，進一步提高操作的效率。

選擇機型說明

為了深入了解不同的選擇，本次測試選擇了四款採用 SLA 光固化樹脂的 3D 列印機。首先，我們選擇了兩款 Formlabs 現有的列印機型。第一款是已經上市一段時間的 Form 3+，這是 2019 年推出的 Form 3 升級版；第二款是 2024 年推出的最新型號 Form 4。這兩款機型代表了 Formlabs 在光固化樹脂 3D 列印領域的先進技術與穩定性。

另外，我們也選擇了兩款基準機型，這些機型的成型區域與 Formlabs 的機型相似，並且售價較為親民。每台列印機皆搭配最新的硬體配置進行測試。舉例來說，Form 3+ 配備了 Form 3 成型槽 V2.1 與成型平台 2。每台機器使用的樹脂，皆是各品牌推薦的標準灰色樹脂，專為該機型設計。例如，Form 3+ 使用的是灰色樹脂 V4，而 Form 4 則使用灰色樹脂 V5。

採購過程

Formlabs 的列印機、配件以及每款 30 公升的樹脂，都是從 Formlabs 官方網站直接購買並運送到測試實驗室。訂購過程中並沒有進行任何特殊處理，列印機也未做任何修改。

基準列印機及相關硬體、材料若有現貨，則從 Amazon 購買，若無則直接向原廠訂購。所有測試用的列印機皆為全新、未開封，並直接送到實驗室測試。

3D模型與切片選擇

選擇

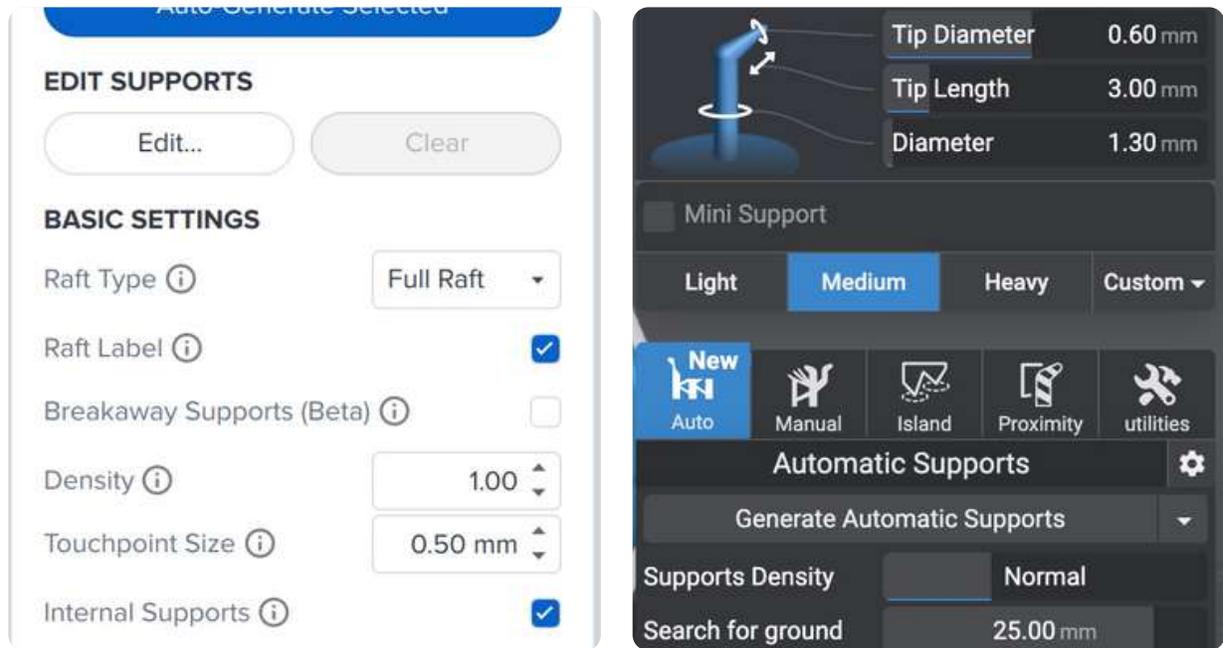
我們選擇了15個來自不同應用、尺寸和形狀的3D模型。這些零件的大小範圍從僅有20毫米的邊界框，到填滿整個列印機成型區域（包括支撐材）。大多數模型需要支撐，無法直接列印在列印平台上。以下是各零件的分類：

- 工程/製造應用：八個零件
 - 六個最終使用零件，適用於汽車、消費品或工業應用
 - 一個夾具，用於模具支撐
 - 一個模具型式的零件
- 生物醫學應用：共五個零件
 - 一個手術導板
 - 一個掃描器官模型（主動脈）
 - 一個醫療器材原型
- 牙科模型：兩個零件
- Formlabs列印診斷模型：兩個零件

所有模型、設計師和說明資訊可在附錄中查詢。大部分模型來自Formlabs的客戶零件，經設計師授權使用；其餘則為模擬現實零件的功能性等效物。兩個診斷模型用於評估樹脂和列印機效能。

切片與設置

為了提高列印成功率，所有模型都使用 PreForm 的自動排列工具 (Auto-Orient) 進行最佳定向設定。這樣的排列方式在所有測試的列印機型上都保持一致，包含 Form 3+、Form 4 以及兩款基準機型。



PreForm (左) 與 Lychee (右) 在預設標準設定下的自動支撐生成工具。

所有列印的支撐生成和最終切片，都在各自列印機的切片軟體中進行。Formlabs的列印機使用的是PreForm軟體，基準列印機則使用Lychee Slicer軟體。對於Formlabs列印機，支撐是透過預設設定（不做修改）使用「自動生成支撐」工具來產生，像是圖中的這個功能。至於基準列印機的支撐，則是用Lychee的自動支撐功能來生成，並且大部分模型都使用Medium支撐設定。唯一例外的是D8模型，因為它的平面較大且容易翹曲，所以使用了Heavy支撐設定，這樣可以避免層間分離問題。

每台列印機的設定都依照廠商推薦的預設來進行調整。對於Formlabs列印機，這些設定已經內建於PreForm軟體中，使用者只需選擇列印機型（Form 3+或Form 4）、樹脂類型（Grey Resin V4或Grey Resin V5）及層厚（100微米）。基準列印機則擁有較為複雜的設定選項，但每種材料的設定都已由廠商公開，並提供使用者參考。此外，也有許多經社群驗證的設定，這些設定已經在兩款列印機上得到實際使用驗證。因此，我們選擇了100微米的層高，確保兩款列印機的層高一致。所有完整的設定資料，請見附錄。

標準操作流程 (SOP)

我們對四款列印機都遵循了標準操作流程，只是不同機型之間有做些微調整。這裡提供了一個簡單的視覺參考。



每台列印機的成型平台（BP）和成型槽（tank）會固定使用在指定的列印機上，以避免因為不同槽與平台的搭配而產生誤差。這些部件會每週進行視覺檢查，確保沒有損壞、穿孔或瑕疵。

對於沒有自動加料功能的列印機，會在每次列印前先將成型槽預先加至接近建議的最大填充高度，這樣能減少樹脂不足的風險。由於Formlabs的列印機擁有自動加樹脂技術，因此不需要進行這個步驟。對於Form 3+，會在列印前先進行初步加樹脂，以加速列印過程；但對於Form 4來說，則不需要這樣操作，因為其全新設計的填充系統提供比Form 3+更快速的填充速度。之後，列印機會根據需要自動將樹脂加至成型槽中，當樹脂匣空了，也會自動更換。

在選定列印排程並開始列印之前，所有的消耗品和配件都會再次檢查。列印過程中，只要沒有錯誤發生，就會讓列印順利進行。如果出現錯誤代碼，會立即記錄並根據螢幕上的提示進行處理：或是重設後繼續列印，或是停止列印並進行處理。如果列印失敗，則會檢查樹脂槽內是否還有剩餘材料，並清潔乾淨再開始下一次列印。



在Form 3+（N3）上完成的零件，分別展示了不同階段的狀態：列印完成後還在列印機上的狀態（左），經過第一次清洗但支撐結構仍在的狀態（中），以及移除支撐結構並固化後的最終完成品（右）。

列印完成後，所有列印品會立即在列印機上拍照紀錄，然後根據需要使用刮刀將零件從列印平台（BP）上移除。接著，濕潤的零件會被帶到Form Wash，放入裝滿異丙醇（IPA）的清洗槽中，清洗5分鐘。清洗後會再拍照紀錄，此時支撐材仍然保留在零件上。然後移除支撐材，並將零件放進第二個IPA槽中清洗10分鐘，以確保表面殘留的樹脂完全被去除。所有零件隨後會進行紫外線固化，使用Form Cure來徹底固化零件並消除表面黏性。最後，會拍攝一組最終完成的零件照片。

由於所有樹脂光固化技術的後處理需求相似，後處理過程中使用了Formlabs的設備，包括清洗階段的Form Wash和固化階段的Form Cure。每台列印機都會進行兩次清洗，以避免過度交叉污染：第一次是主要清洗，用來去除大部分樹脂，第二次是較乾淨的次清洗，目的是去除殘留的樹脂。每進行100次清洗後，會更換新的異丙醇（IPA），以防IPA被樹脂飽和，導致清洗效果下降。

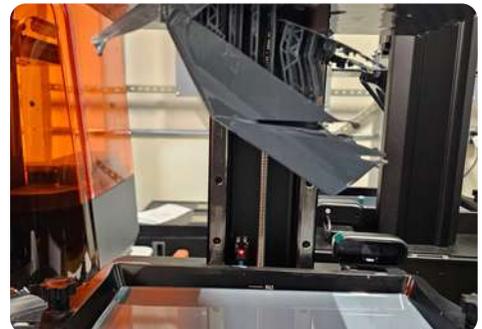
觀察與測量

每次列印完成後，會判定是否成功。若列印過程中發生嚴重問題，導致零件無法正常使用，則標註為失敗。以下是常見的情況：

- 無法附於列印平台：若第一層樹脂無法黏附於列印平台，或在列印過程中脫離，結果平台上未能成功列印出零件。



- 嚴重脫層：零件只列印出部分，或是出現大範圍的空洞。



- 列印結束翹曲：零件翹曲至脫離成型平台，導致無法繼續使用



- 列印中未完全成形的細節：通常是因為列印過程中某部分脫層，造成連鎖性的列印失敗。



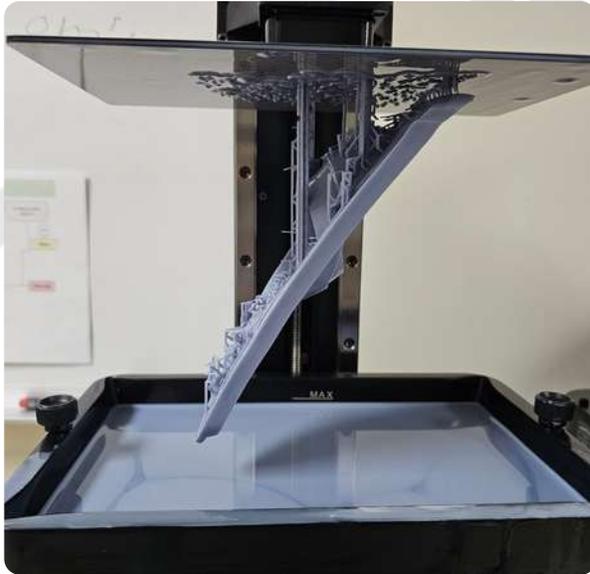
雖然有些輕微的瑕疵，但因為列印最終順利完成，仍然標註為成功。以下是一些例子：

- 表面條紋：零件表面出現一條條線狀或波紋狀的缺陷
- 輕微翹曲：零件翹曲的程度不影響列印過程，但可能會影響組裝時的配合度

- 列印中小孔：列印過程中出現的非預期小洞，通常是垂直方向的



- 支撐痕跡過重：支撐結構留下的痕跡或損傷，可能會影響零件的正常功能



剩下的零件基本沒問題，只有些許外觀或尺寸上的小瑕疵，並不影響使用。

測試結果

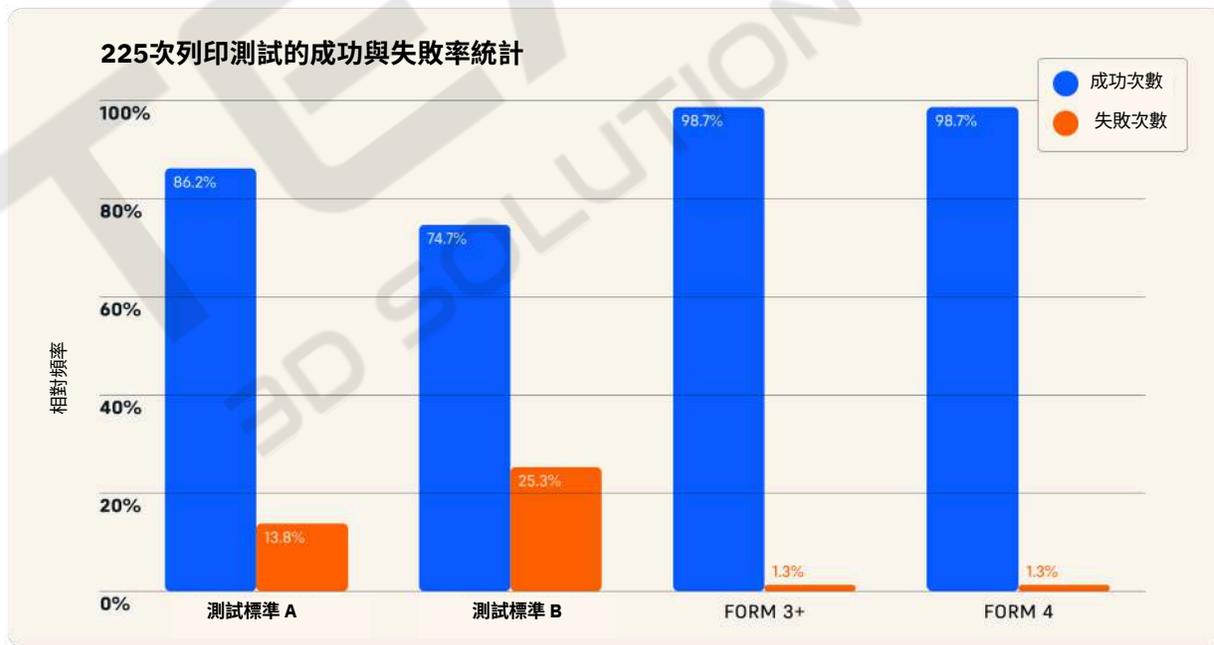
硬體穩定性

這次測試的第一個重點是確認列印機是否能正常啟動並持續運行。所有五台Form 4、Form 3+列印機，以及Benchmark A的列印機，收到時都沒有問題，並且都能在15分鐘內完成設置並開始列印，完全不需要進行故障排除或調整。這樣的情況在測試期間持續保持，Form 4和Benchmark A的列印機都沒有出現機械問題，唯一的情況是五台Form 3+列印機中的一台，在測試兩個半星期後，X軸發出輕微異音，但這並未影響列印品質。Benchmark A的列印機在運行三週後，系統有提示需要更換釋放膜，雖然此時螢幕沒有任何損壞，但還是依照提示進行更換。

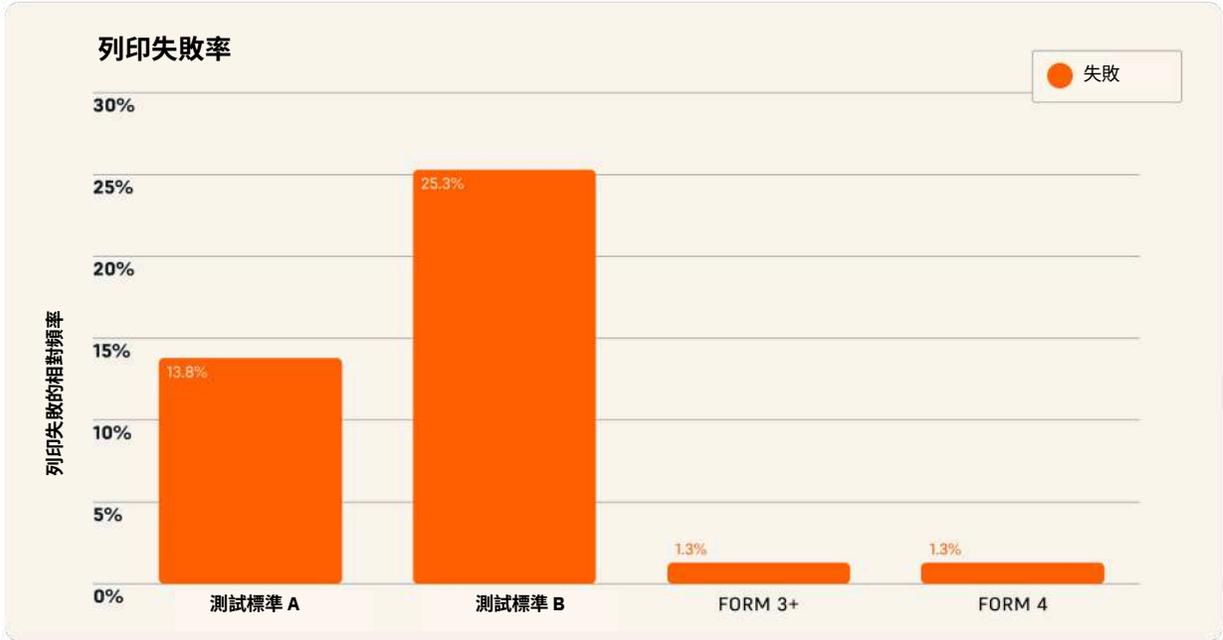
相較之下，Benchmark B的列印機就出現了較多問題，其中有一台在收到時就無法啟動，另外一台在運行三天後，LCD顯示故障。這些列印機在開始使用前需要調整成型平台的水平，並且有三台列印機在測試中發現無法保持定位，導致成型平台在列印時下降超過LCD範圍，造成平台和LCD碰撞。這個問題經由操作員手動調整啟動高度後解決，這樣就不會再發生馬達卡住的情況。

整體來看，Form 4和Form 3+的表現穩定，使用過程中只需基本維護即可順利列印。而Benchmark B則顯示出較多的硬體問題，這可能需要更多時間來測試並確定其長期使用的穩定性。

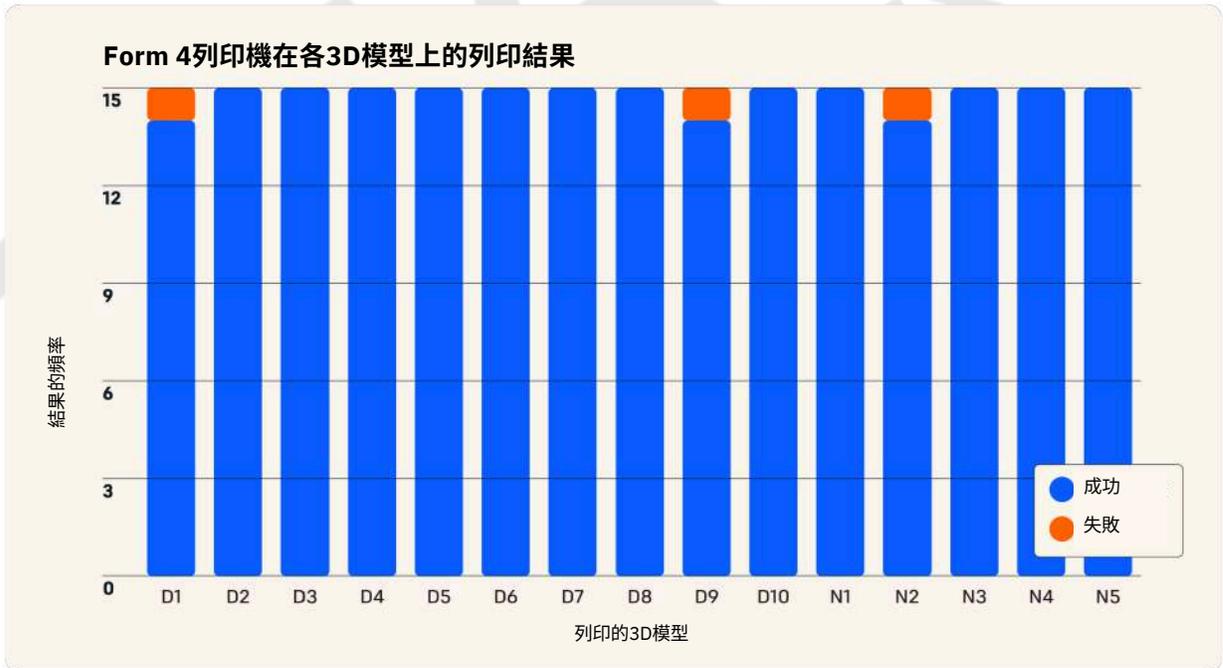
列印機穩定性

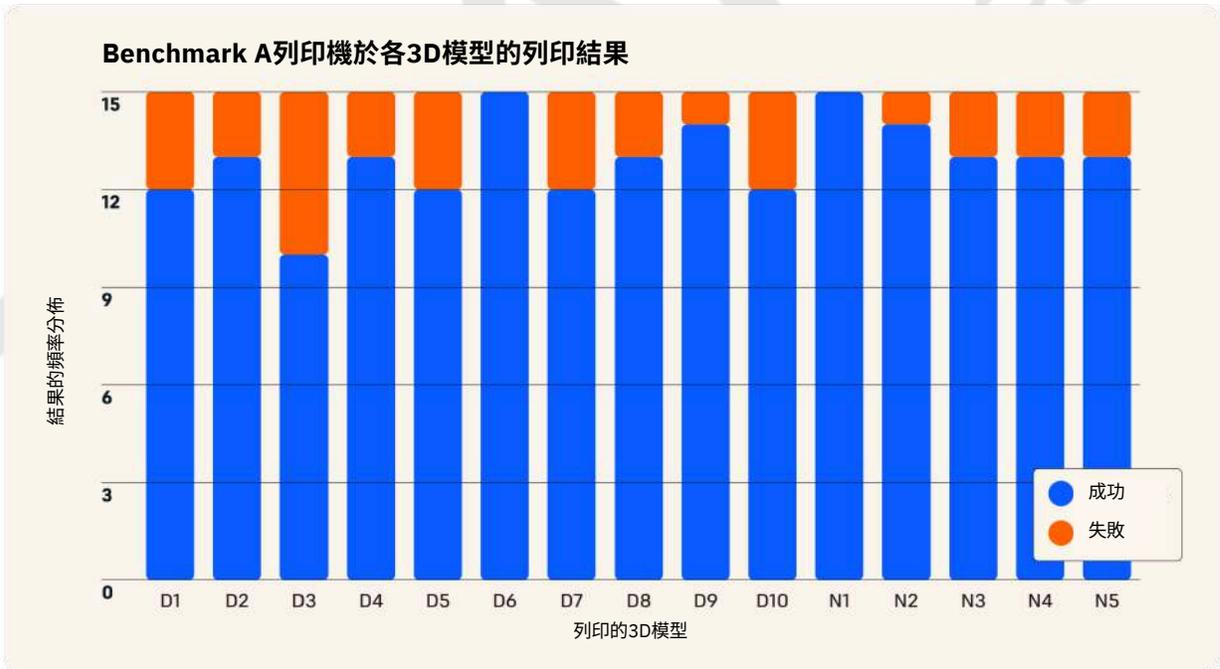
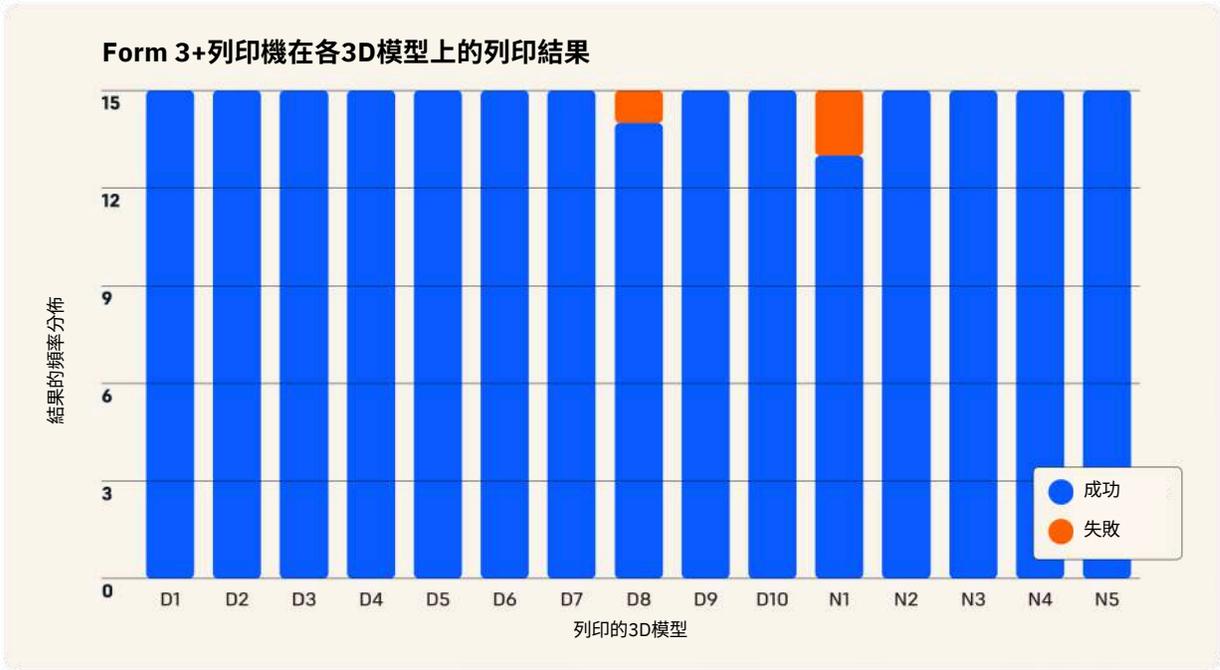


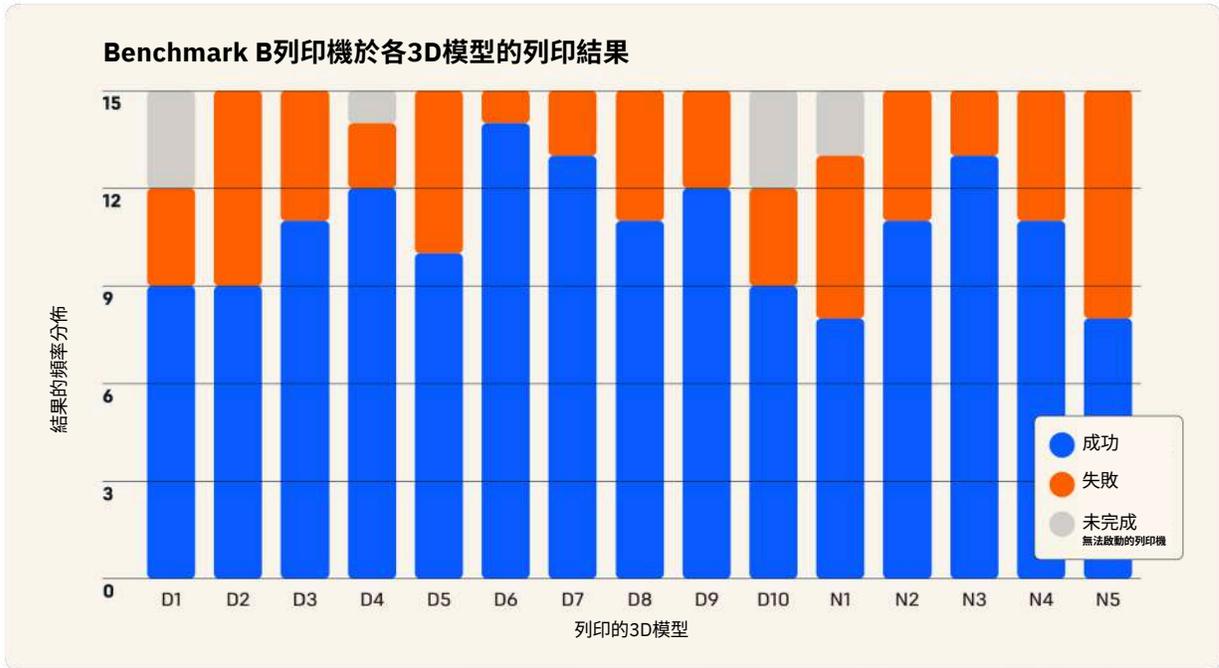
測試結果顯示，Formlabs的Form 4和Form 3+列印機的失敗率分別為1.3%，而Benchmark A的失敗率為13.8%，Benchmark B表現最差，失敗率高達25.3%。為了深入分析問題，我們可以專注於錯誤率的具體情況，詳情如下。這些失敗率通常會與零件成本、失敗模式與效應分析（FMEA）等重要因素有關。此外，為了排除異常數據，我們還可以進一步根據不同的列印機型來檢視是否某些特定的幾何形狀會影響失敗率。



列印機型的穩定性







雖然某些模型的幾何形狀在不同列印機型上會有較高的失敗率，但整體來說，失敗情況在各種列印件上算是分佈均勻。大部分的模型在Form 3+和Form 4列印機上都能順利完成列印，沒有發生失敗。

結論

在過去十年，3D列印已經成為許多專業人士常用的工具，對於穩定又可靠的列印機需求也越來越高。本報告主要是透過公正第三方所收集的數據，來分析現有光固化3D列印機的性能表現，幫助使用者找到最適合自己需求的列印設備。

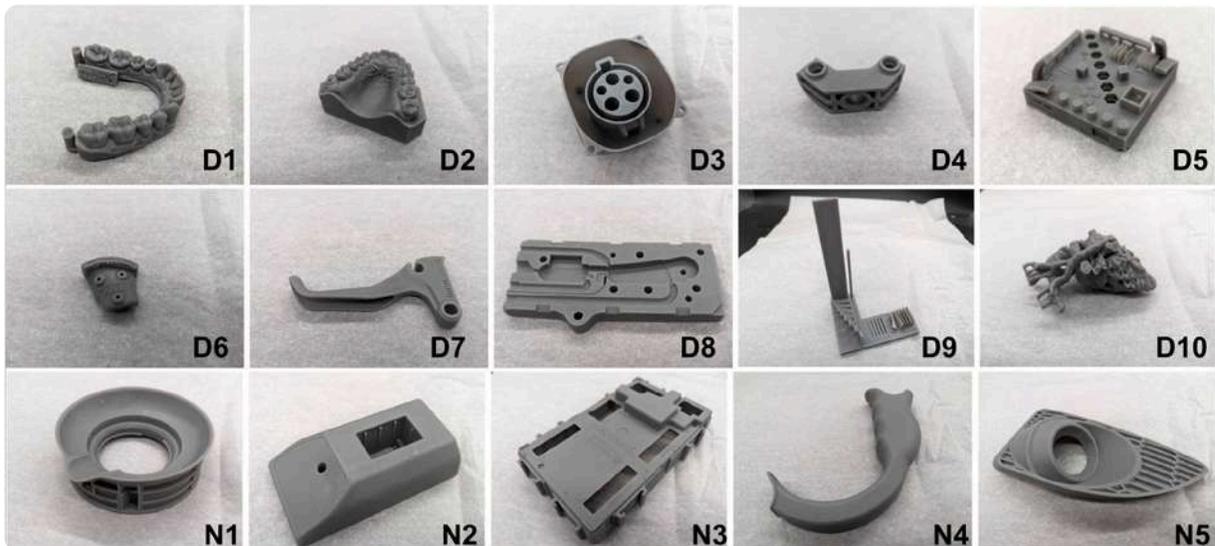
這些數據能幫助使用者更容易判斷哪款3D列印機最適合自己的需求。對於要求不高的應用場合，平價的列印機或許就夠用；但如果是專業用途，像是需要穩定性高、精度準確、且減少人工操作的列印需求，Formlabs的列印機表現會更優異。畢竟列印失敗不只浪費樹脂和耗材，還會拖延工時、增加額外人力成本，甚至造成不必要的麻煩和挫折感。

為了確保數據的品質與可信度，這次測試由國際知名的獨立產品測試機構執行。Formlabs（Form 4 與 Form 3+ 的製造商）負責制定測試標準與流程，並由第三方測試實驗室依照這些標準進行測試，目的是確保所有列印機都在相同條件下進行公平的測試。

透過與第三方測試實驗室合作，Formlabs不僅能確保測試結果的準確性、公正性與數據品質，同時能推動列印機可靠性測試的標準化流程。過去，有關可靠性、精確度、列印速度等性能表現，多半由各家廠商自行驗證，與材料特性不同，材料多半有既定的測試方法，並經過第三方實驗室的認證。這次測試的主要目的是推動建立相關性能測試的標準，並持續朝向增進增材製造領域的 ASTM或ISO 國際標準邁進，期望未來所有3D 列印廠商，都能更輕鬆驗證自家產品的性能，同時為計劃將3D列印應用於量產的製造業者，提供可靠的數據參考。

附錄

1.0 模型介紹



ID	名稱	設計師
D1	牙弓模型	Formlabs
D2	牙齦模型	Formlabs
D3	電動車J1772連接器端口	Formlabs by J1772 standard
D4	鑽孔定位夾具	Formlabs
D5	Formlabs測試樣本1	Formlabs
D6	骨盆手術導引	Insight Surgery
D7	自行車剎車把手	Formlabs
D8	軟性致動器包覆模具	RightHand Robotics
D9	Formlabs測試樣本2	Formlabs
D10	掃描的主動脈	Northwell Health
N1	倒嘴原型	Formlabs
N2	電池外殼蓋板	Avance Design
N3	汽車外殼	Continental
N4	氣道裝置	VIDA Medical Devices
N5	霧燈罩	Formlabs

Formlabs 所設計的模式可以透過此處下載為 ZIP 檔案。這些 STL 檔案已為成功的樹脂預設好適合樹脂列印的擺放方向，但仍需透過切片軟體生成支撐結構，以確保列印品質穩定。

2.0 列印設定

2.1 Benchmark A 列印機參數設定

Global Parameters

Two Stage Motion Control (TSMC) on off

Light off Delay (On) / Resting time (Off) on off

Burn In Layers

Number of Layers: 6

Exposure Time: 35 s

Transition Layers Count: 6

Lift Distance: 4 mm

Retract Distance: 4 mm

Lift Speed: 60 mm/m

Retract Speed: 180 mm/m

Light Intensity: 100 %

Normal Layers

Layer Thickness: 100 um

Exposure Time: 3.5 s

Lift Distance: 4 mm

Retract Distance: 4 mm

Lift Speed: 60 mm/m

Retract Speed: 180 mm/m

Wait Before Print: 1 s

Wait After Print: 0 s

Wait After Lift: 0 s

Light Intensity: 100 %

Scene Scale compensation

Scale X: 100 %

Scale Y: 100 %

Scale Z: 100 %

Compensation

Compensation Type: Grey Pixel Pixel Removal

Burn In Layers: 0

Normal Layers: 0

Support resin compensation: on off

Price

Bottle Price: 0 USD

Bottle Capacity: 1 l

Print Time Override

Print Time Override: on off

Time per Burn in layer: 0 s

Time per layer: 0 s

2.2 Benchmark B 列印機參數設定

Global Parameters

Two Stage Motion Control (TSMC) on off

Light off Delay (On) / Resting time (Off) on off

Burn In Layers

Number of Layers: 6

Exposure Time: 40 s

Transition Layers Count: 6

Lift Distance: 8 mm

Retract Distance: 8 mm

Lift Speed: 60 mm/m

Retract Speed: 180 mm/m

Light Intensity: 100 %

Normal Layers

Layer Thickness: 100 um

Exposure Time: 3.5 s

Lift Distance: 8 mm

Retract Distance: 8 mm

Lift Speed: 60 mm/m

Retract Speed: 180 mm/m

Wait Before Print: 2 s

Wait After Print: 0 s

Wait After Lift: 0 s

Light Intensity: 100 %

Scene Scale compensation

Scale X: 100 %

Scale Y: 100 %

Scale Z: 100 %

Compensation

Compensation Type: Grey Pixel Pixel Removal

Burn In Layers: 0

Normal Layers: 0

Support resin compensation: on off

Price

Bottle Price: 0 USD

Bottle Capacity: 1 l

Print Time Override

Print Time Override: on off

Time per Burn in layer: 0 s

Time per layer: 0 s

3.0 定義

名詞

報告中的定義

列印機	每台3D列印機皆有序號管理
模型	特定幾何形狀的設計檔案
列印成品	列印出來的實體列印模型
機械穩定性	列印機在運作時各項功能正常運作的可靠程度，像馬達轉動、LCD螢幕顯示、電源運作正常等
列印穩定性	列印機成功列印模型的穩定程度，且列印成品不會因重大問題而導致無法正常使用

TEAMMA
3D SOLUTION EXPERT